



Diogo Gabriel Rocha Morgado

Licenciado em Ciências da Engenharia
Eletrotécnica e de Computadores

Controlo de Velocidade de um Veículo Elétrico Autónomo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Doutor João Francisco Alves Martins, Prof. Auxiliar,
Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Prof. Doutor João Murta Pina, Prof. Auxiliar,
Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Mário Fernando da Silva Ventim Neves

Arguente: Prof. Doutor Luís Filipe Figueira de Brito Palma

Arguente: Professor Daniel José Medronho Foito

Vogal: Prof. Doutor João Francisco Alves Martins

Vogal: Prof. Doutor João Murta Pina



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março, 2013

Controlo de Velocidade de um Veículo Elétrico Autónomo

Copyright © Diogo Gabriel Rocha Morgado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

“They cheer me because they all understand me, and they cheer you because no one understands you.”

(Charles Chaplin to Albert Einstein)

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor João Martins, e ao co-orientador, Professor João Murta Pina, pela ajuda, apoio e paciência no trabalho realizado nesta tese. Gostaria de mostrar também a minha gratidão aos restantes professores do Departamento de Engenharia Eletrotécnica, da área de energias, pela forma como lecionam as cadeiras, motivando-me assim a seguir esta área.

Obrigado aos meus colegas também, pelos momentos passados ao longo de todo o curso, tanto em tempos de festa, como em tempos de trabalho árduo, que foi necessário fazer durante este percurso. Sem dúvida, foi uma ajuda fundamental para superar todos os obstáculos encontrados.

Por último, gostaria de agradecer à minha família, que sem eles, nada disto teria sido possível.

A todos, muito obrigado!

Resumo

A presente dissertação aborda o controlo de velocidade de um veículo elétrico autónomo. A dinâmica do veículo será testada em diferentes situações de percurso, tais como, curvas e rampas. De modo a simular as diferentes situações com o veículo será necessário fazer um estudo aprofundado sobre a sua dinâmica.

Serão usados três tipos de motorizações: motor CC (corrente contínua), Assíncrono e Síncrono de Magnetos permanentes. Cada uma das motorizações apresenta vantagens e desvantagens em relação às outras e diferentes técnicas de controlo, sendo feita no fim uma análise comparativa das três.

O motor CC apresenta o controlo de velocidade mais simples das três motorizações apresentadas. Neste caso, a velocidade é diretamente proporcional à tensão de alimentação. Portanto, para controlar este motor será usado um controlador PI, que em função da velocidade pretendida irá devolver um valor de tensão que será aplicado ao motor.

Para o motor assíncrono será usado o controlo por orientação de campo, que é uma técnica frequentemente usada neste tipo de motores.

Para finalizar, será usada a técnica de controlo de corrente retangular para o motor síncrono de magnetos permanentes.

Palavras-chave: veículo elétrico, velocidade, corrente contínua (CC), Assíncrono, Síncrono de Magnetos Permanentes, controlo.

Abstract

This dissertation approaches the speed control of an autonomous electric vehicle. The dynamics of the vehicle will be tested in different situations route, such as curves and ramps. In order to simulate the different situations with the vehicle it will be necessary to make a detailed study of their dynamics.

It will be used three types of engines: motor DC (direct current), Asynchronous and Permanent Magnet Synchronous. Each engine has advantages and disadvantages compared to other and different control techniques, thus being, a comparative analysis of three will be made at the end.

The DC motor speed control provides the simplest of the three engines presented. In this case, the speed is directly proportional to supply voltage. Therefore, to control this motor, a PI controller is used, which depending on the desired speed, it will return a value of voltage to be applied on the motor.

For asynchronous motor it will be used the field oriented control, which is a technique often used in such engines.

To end, it will be used the rectangular current control technique for the permanent magnet synchronous motor.

Keywords: electric vehicle, speed, direct current (DC), Asynchronous, Permanent Magnet Synchronous, control.

Índice de Matérias

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVOS E MOTIVAÇÃO.....	1
1.2. CONTRIBUIÇÕES.....	2
1.3. ESTADO DA ARTE	2
1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	6
2. DINÂMICA DO VEÍCULO.....	7
2.1. SISTEMA DE COORDENADAS	7
2.2. FORÇAS APLICADAS NO VEÍCULO.....	8
2.2.1. <i>Força Total de Resistência ao movimento do veículo.....</i>	<i>9</i>
2.2.2. <i>Força Resistente ao Rolamento do pneu.....</i>	<i>11</i>
2.2.3. <i>Força de Resistência Aerodinâmica</i>	<i>11</i>
2.2.4. <i>Força de Inclinação da estrada.....</i>	<i>12</i>
2.3. EQUAÇÕES DO MOVIMENTO	13
2.3.1. <i>Dinâmica do motor elétrico</i>	<i>13</i>
2.3.2. <i>Dinâmica do pneu.....</i>	<i>14</i>
2.3.3. <i>Dinâmica do veículo</i>	<i>19</i>
3. MODELO COMPLETO DE SIMULAÇÃO (VEÍCULO E MOTOR)	23
3.1. MODELO SIMPLIFICADO DE UM MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA.....	23
3.1.1. <i>Princípio de funcionamento.....</i>	<i>24</i>
3.1.2. <i>Equações do motor CC.....</i>	<i>25</i>
3.1.3. <i>Conversor CC-CC.....</i>	<i>26</i>
3.2. TÉCNICA DE CONTROLO DO MOTOR CC	28
3.3. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO COMPLETO DE SIMULAÇÃO	30
4. MOTORIZAÇÕES E TÉCNICAS DE CONTROLO	43
4.1. MOTOR CC COM CONTROLO	43
4.2. DESCRIÇÃO E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MOTOR ASSÍNCRONO.....	49
4.2.1. <i>Técnica de controlo do motor assíncrono</i>	<i>51</i>
4.2.2. <i>Implementação do modelo completo de simulação.....</i>	<i>53</i>
4.3. MOTOR SÍNCRONO DE MAGNETOS PERMANENTES.....	57
4.3.1. <i>Princípio de funcionamento.....</i>	<i>58</i>

4.3.2.	<i>Modelo dinâmico do motor síncrono de magnetos permanentes</i>	<i>59</i>
4.3.3.	<i>Técnicas de controlo do motor síncrono de magnetos permanentes</i>	<i>60</i>
4.3.4.	<i>Implementação do modelo completo de simulação.....</i>	<i>64</i>
5.	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	71
5.1.	CONCLUSÕES	71
5.2.	TRABALHO FUTURO	72
6.	BIBLIOGRAFIA.....	73
7.	ANEXOS	75
	ANEXO A – ESQUEMA DO BLOCO DA DINÂMICA DO VEÍCULO	75

Índice de Figuras

FIGURA 1.1 - MODELO GLOBAL DO CONJUNTO MOTOR/CONTROLADOR/CONVERSOR/VEÍCULO.	1
FIGURA 2.1 - SISTEMA DE COORDENADAS DO VEÍCULO FIXO NA TERRA [8].	7
FIGURA 2.2 - FORÇAS APLICADAS NO VEÍCULO (ADAPTADO DE [8]).	9
FIGURA 2.3 - FORÇA TOTAL DE RESISTÊNCIA PARA $\theta = 0$.	10
FIGURA 2.4 - FORÇA TOTAL DE RESISTÊNCIA PARA $\theta \neq 0$.	10
FIGURA 2.5 - COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA AERODINÂMICA [9].	12
FIGURA 2.6 - FORÇA LONGITUDINAL.	17
FIGURA 2.7 - FORÇA LATERAL E LONGITUDINAL.	17
FIGURA 2.8 - DIAGRAMA DE BLOCOS DA DINÂMICA DO PNEU [7].	18
FIGURA 2.9 - DIAGRAMA DE FORÇAS APLICADAS SOBRE O VEÍCULO (ADAPTADO DE [7]).	20
FIGURA 3.1 - CARACTERÍSTICAS DE UM MOTOR CC (ADAPTADO DE [12]).	24
FIGURA 3.2 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO MOTOR CC COM EXCITAÇÃO INDEPENDENTE.	25
FIGURA 3.3 - ZONAS DE OPERAÇÃO DO MOTOR CC.	26
FIGURA 3.4 - CONVERSOR OPERACIONAL NOS QUATRO QUADRANTES [13].	27
FIGURA 3.5 - CURVA DE REAÇÃO DA INSTALAÇÃO A UM DEGRAU UNITÁRIO [24].	29
FIGURA 3.6 - SISTEMA CONVERSOR/MOTOR/VEÍCULO.	30
FIGURA 3.7 - CONVERSOR CC/CC ALIMENTADO POR UMA BATERIA.	31
FIGURA 3.8 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO MOTOR CC SEM ACIONAMENTO COM A DINÂMICA DO VEÍCULO.	32
FIGURA 3.9 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO BLOCO MOTOR CC SEM ACIONAMENTO.	32
FIGURA 3.10 - PERCURSO SIMULADO.	33
FIGURA 3.11 - CORRENTE NO INDUZIDO DO MOTOR.	34
FIGURA 3.12 - CORRENTE NO INDUZIDO DO MOTOR.	34
FIGURA 3.13 - BINÁRIO DO MOTOR.	35
FIGURA 3.14 - FORÇAS LONGITUDINAL E LATERAL.	35
FIGURA 3.15 - DISTÂNCIA PERCORRIDA SEGUNDO EIXO X.	36

FIGURA 3.16 - DISTÂNCIA PERCORRIDA SEGUNDO O EIXO Y.	36
FIGURA 3.17 - PERCURSO RETILÍNEO COM VARIAÇÕES DE VELOCIDADE.	37
FIGURA 3.18 - VELOCIDADE DAS RODAS E DO VEÍCULO.	37
FIGURA 3.19 – ESCORREGAMENTO.	38
FIGURA 3.20 - CORRENTE DO MOTOR.	39
FIGURA 3.21 - BINÁRIO DO MOTOR.	39
FIGURA 3.22 - FORÇAS LONGITUDINAL E LATERAL NO CONTACTO PNEU-ESTRADA.	40
FIGURA 3.23 - DISTÂNCIA PERCORRIDA SEGUNDO O EIXO X.	40
FIGURA 3.24 - VELOCIDADE DAS RODAS E DO VEÍCULO.	41
FIGURA 3.25 - CORRENTE NO MOTOR LIMITADA A 100 A.	41
FIGURA 4.1 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO MOTOR CC COM ACIONAMENTO COM A DINÂMICA DO VEÍCULO.	43
FIGURA 4.2 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO INTERIOR DO BLOCO MOTOR CC COM CONVERSOR DE 4 QUADRANTES.	44
FIGURA 4.3 - BLOCO DO CONVERSOR DE 4 QUADRANTES COM MOTOR CC.	45
FIGURA 4.4 - VELOCIDADE DAS RODAS E DO VEÍCULO.	46
FIGURA 4.5 – ESCORREGAMENTO.	47
FIGURA 4.6 - CORRENTE NO INDUZIDO DO MOTOR.	47
FIGURA 4.7 - BINÁRIO DO MOTOR.	48
FIGURA 4.8 - FORÇAS LONGITUDINAL NO CONTACTO PNEU-ESTRADA.	48
FIGURA 4.9 - DISTÂNCIA PERCORRIDA SEGUNDO O EIXO X.	49
FIGURA 4.10 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO MOTOR ASSÍNCRONO COM CONTROLO POR ORIENTAÇÃO DE CAMPO.	53
FIGURA 4.11 - CONTROLO POR ORIENTAÇÃO DE CAMPO (CONTROLO VETORIAL).	55
FIGURA 4.12 - VELOCIDADE DAS RODAS E DO VEÍCULO	55
FIGURA 4.13 - CORRENTE E BINÁRIO DO MOTOR.	56
FIGURA 4.14 - FORÇAS LONGITUDINAL NO CONTACTO PNEU-ESTRADA.	57
FIGURA 4.15 - DISTÂNCIA PERCORRIDA SEGUNDO O EIXO X.	57
FIGURA 4.16 - CONSTITUIÇÃO DO MOTOR DE MAGNETOS PERMANENTES (SENDOS MAGNETOS A PARTE PRETA E O FERRO A PARTE CINZENTA) [20].	58
FIGURA 4.17 - FORMA DE ONDA TRAPEZOIDAL DAS FORÇAS CONTRA ELETROMOTRIZES NOS MOTORES SÍNCRONOS DE MAGNETOS PERMANENTES [19].	61
FIGURA 4.18 - SINAIS OBTIDOS PELOS SENSORES DE HALL (ADAPTADO DE [19]).	61
FIGURA 4.19 - INVERSOR TRIFÁSICO [18].	62
FIGURA 4.20 - VETORES DE FLUXO DO ESTATOR NO CONTROLO DE CORRENTE RETANGULAR [18].	62

FIGURA 4.21 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO MSMP COM CONTROLO DE CORRENTE RETANGULAR.	64
FIGURA 4.22 - VELOCIDADE DAS RODAS E DO VEÍCULO.	65
FIGURA 4.23 – ESCORREGAMENTO.	66
FIGURA 4.24 - CORRENTE NO ROTOR DO MOTOR.	67
FIGURA 4.25 - BINÁRIO DO MOTOR.	67
FIGURA 4.26 - FORÇAS LONGITUDINAL NO CONTACTO PNEU-ESTRADA.	68
FIGURA 4.27 - DISTÂNCIA PERCORRIDA SEGUNDO O EIXO X.	68

Índice de Tabelas

TABELA 1.1 - COMPARAÇÃO DOS MOTORES AC E CC ([2]).	4
TABELA 2.1 - COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO [9].	11
TABELA 3.1 - QUADRANTE DE OPERAÇÃO DE UM MOTOR CC (ADAPTADO DE [13]).	27
TABELA 3.2 - DIMENSIONAMENTO DO CONTROLADOR PID [24].	29
TABELA 4.1 - CARACTERÍSTICAS DO MOTOR CC	44
TABELA 4.2 - CARACTERÍSTICAS DO MOTOR ASSÍNCRONO.	54
TABELA 4.3 - SEQUÊNCIA DE COMUTAÇÃO NO SENTIDO DOS PONTEIROS DO RELÓGIO.	63
TABELA 4.4 - SEQUÊNCIA DE COMUTAÇÃO NO SENTIDO CONTRÁRIO DOS PONTEIROS DO RELÓGIO.	63
TABELA 4.5 - CARACTERÍSTICAS DO MOTOR SÍNCRONO DE MAGNETOS PERMANENTES.	65
TABELA 4.6 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS MÉTODOS DE CONTROLO IMPLEMENTADOS.	69

Lista de Símbolos e Abreviaturas

Símbolos:

A_f – Área frontal do veículo [m^2]

B – Densidade do campo magnético [Wb/m^2]

B_M – Valor máximo da densidade de campo magnético [Wb/m^2]

b – Coeficiente de atrito viscoso [N.m.s]

C_D – Coeficiente de resistência aerodinâmico

E – Tensão total no enrolamento no induzido [V]

e – Tensão induzida [V]

F – Força atuante num corpo [N]

F_{DA} – Força de resistência aerodinâmica [N]

F_I – Força de inclinação [N]

F_{RR} – Força resistente ao rolamento do pneu [N]

F_{RR1} – Força resistente ao rolamento da roda 1 [N]

F_{RR2} – Força resistente ao rolamento da roda 2 [N]

F_{RR3} – Força resistente ao rolamento da roda 3 [N]

F_{RR4} – Força resistente ao rolamento da roda 4 [N]

F_{RT} – Força de resistência ao rolamento total [N]

F_c – Força centrípeta [N]

F_{mag} – Força magnética [N]

F_{mm} – Força magneto motriz [N]

F_{x1} – Força na roda 1 segundo o eixo x [N]

F_{x2} – Força na roda 2 segundo o eixo x [N]
 F_{y1} – Força na roda 1 segundo o eixo y [N]
 F_{y2} – Força na roda 2 segundo o eixo y [N]
 F_r – Força total de resistência ao movimento do veículo [N]
 F_x – Força longitudinal [N]
 F_y – Força lateral [N]
 F_z – Força sobre a roda [N]
 f_r – Coeficiente de resistência ao rolamento
 f – Frequência [Hz]
 g – Constante gravitacional [m/s²]
 H – Campo magnético [A/m]
 H_a – Campo magnético do sistema trifásico na fase a [A/m]
 H_b – Campo magnético do sistema trifásico na fase b [A/m]
 H_c – Campo magnético do sistema trifásico na fase c [A/m]
 I_a – Corrente do sistema trifásico na fase a [A]
 I_b – Corrente do sistema trifásico na fase b [A]
 I_c – Corrente do sistema trifásico na fase c [A]
 I_{abc} – Corrente do sistema trifásico [A]
 i – Corrente [A]
 i_a – Corrente no induzido [A]
 i_f – Corrente de campo [A]
 i_{cx} – Relação de transmissão da caixa redutora
 i_{ds} – Corrente no estator segundo o eixo d do referencial dq [A]
 i_{qs} – Corrente no estator segundo o eixo q do referencial dq [A]
 i_s – Corrente nos enrolamentos do estator [A]
 J_m – Momento de inércia do motor [kg. m²]

J_{ω} – Momento de inércia da roda [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]
 J_{Vt} – Momento de inércia do veículo visto pelo veio do motor [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]
 J_V – Momento de inércia correspondente à massa do veículo [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]
 K_T – Constante de elasticidade do pneu [N/m]
 k_a – Constante adimensional
 k – Constante de proporcionalidade
 k_f – Constante de proporcionalidade
 k_i – Ganho integral do controlador PI/PID
 k_p – Ganho proporcional do controlador PI/PID
 k_d – Ganho derivativa do controlador PID
 L_a – Indutância do induzido [H]
 L_d – Indutância segundo o eixo d [H]
 L_m – Indutância mútua [H/m]
 L_q – Indutância segundo o eixo q [H]
 L_r – Indutância própria do rotor [H]
 l – Comprimento do fio [m]
 m – Massa do veículo [Kg]
 N_{esp} – Número de espiras
 n_s – Velocidade de sincronismo [rpm]
 η – Rendimento da caixa redutora
 P_{pneu} – Peso do pneu [N]
 P_r – Pressão atmosférica [kPa]
 p – Par de pólos
 R_a – Resistência do induzido [Ω]
 R_f – Resistência de campo [Ω]
 R – Raio da curva [m]

r_e – Raio efetivo da roda [m]
 r_s – Raio estático [m]
 r_0 – Raio da roda em vazio [m]
 s – Escorregamento do motor assíncrono
 T – Binário atuante num corpo [N.m]
 T_{ar} – Temperatura do ar [°C]
 T_e – Binário eletromagnético [N.m]
 T_m – Binário do motor [N.m]
 T_r – Binário resistente [N.m]
 $T_{r\omega}$ – Binário resistente visto pela roda [N.m]
 V – Tensão no circuito do induzido [V]
 V_v – Velocidade do veículo [m/s]
 V_ω – Velocidade das rodas [m/s]
 V_x – Velocidade segundo o eixo x [m/s]
 V_y – Velocidade segundo o eixo y [m/s]
 v – Componente perpendicular da velocidade [m/s]
 v_f – Tensão de campo [V]
 v_a – Tensão simples na fase a [V]
 v_b – Tensão simples na fase b [V]
 v_c – Tensão simples na fase c [V]
 v_d – Componente de tensão segundo o eixo direto d [V]
 v_q – Componente de tensão segundo o eixo em quadratura q [V]
 X – Direção do plano horizontal segundo o eixo X
 Y – Direção do plano horizontal segundo o eixo Y
 Z – Direção vertical
 θ – Ângulo de inclinação da estrada [°]
 θ_e – Fase do fluxo ligado no rotor [°]

δ – Ângulo da direção [°]

β – Ângulo de deslizamento lateral entre o vetor velocidade do veículo e o eixo x

ρ – Densidade do ar [kg/m³]

\emptyset – Fluxo magnético [Wb]

τ_m – Constante de tempo mecânica [s]

τ_a – Constante de tempo elétrica [s]

λ – Escorregamento do veículo

α – Escorregamento lateral do pneu [°]

ω_e – Velocidade angular num enrolamento percorrido por uma corrente sinusoidal no tempo [rad/s]

ω_m – Velocidade angular do motor [rad/s]

ω_r – Velocidade angular da roda [rad/s]

ω_{rotor} – Velocidade de rotação elétrica do rotor [rad/s]

ω_{sl} – Velocidade do campo girante do estator em relação ao rotor [rad/s]

ψ_a – Fluxo magnético no induzido produzido pela corrente i_a [Wb]

ψ_f – Fluxo magnético de excitação produzido pela corrente i_f [Wb]

ψ_r – Amplitude do fluxo ligado no rotor [Wb]

ψ_{qr} – Fluxo segundo o eixo de quadratura [Wb]

λ_q – Fluxo magnético no eixo q [Wb]

λ_d – Fluxo magnético no eixo d [Wb]

λ_{af} – Fluxo magnético devido à interação criada pelos magnetos permanentes entre o rotor e o estator [Wb]

Abreviaturas:

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

f.e.m. – Força eletromotriz

MSMP – Motor Síncrono de Magnetos Permanentes

PI – Proporcional Integral

PID – Proporcional Integral Derivativo

PWM – Pulse-Width Modulation

rpm – Rotações por minuto

1. Introdução

1.1. Objetivos e motivação

A presente dissertação tem como objetivo o estudo e modelação do controlo de velocidade de um veículo elétrico autónomo, usando três tipos de motorização: motor CC, assíncrono e síncrono de magnetos permanentes, sendo feita uma análise comparativa entre eles no final. Tendo em vista o dimensionamento da dinâmica do veículo e do controlo dos motores será usada a ferramenta de *software* Matlab para o seu desenvolvimento. Na Figura 1.1 pode observar-se o diagrama do sistema que se pretende implementar. A velocidade de referência pretendida no veículo entra no controlador, que consequentemente devolve o comando dos interruptores a ser aplicado no conversor. O conversor por sua vez, devolve a tensão a ser aplicada no motor que depois será transformada numa força. Essa força é aplicada ao veículo que desenvolve uma velocidade que é determinada através de sensores. Essa velocidade é depois subtraída à velocidade de referência, que se trata do erro entre elas, até atingir a velocidade pretendida.

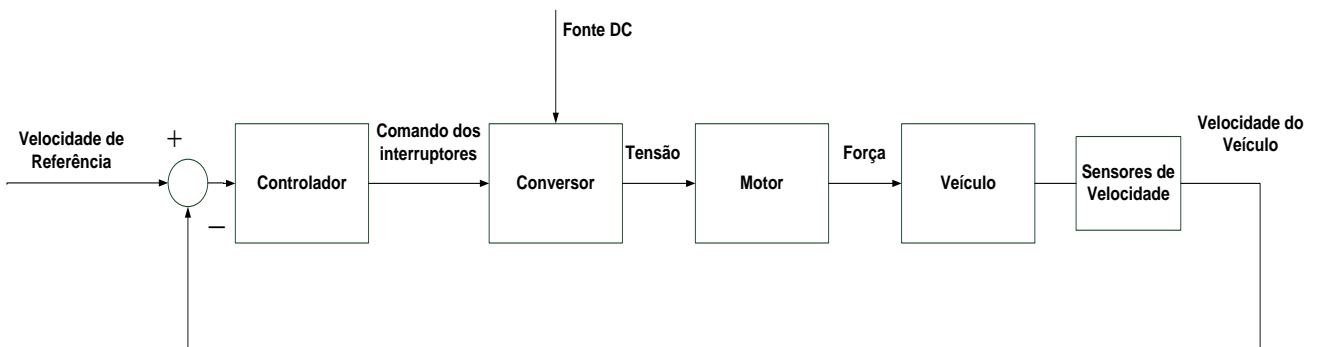


Figura 1.1 - Modelo global do conjunto Motor/Controlador/Conversor/Veículo.

A investigação e desenvolvimento em veículos elétricos têm sido alvo de um grande interesse nos últimos anos, cuja importância no sector dos transportes poderá ser cada vez maior, devido aos problemas ambientais relacionados à utilização de veículos de combustão interna (CI). Para além do petróleo ser cada vez uma fonte mais limitada, o seu preço também continua a aumentar, o que leva o ser humano a pensar noutras alternativas. Com o crescimento da população mundial, o número de

veículos rodoviários irá sofrer também um grande aumento, sendo estes, grande parte, movidos por motores CI. Este fator levanta questões referentes às reservas petrolíferas existentes, assim como às emissões poluentes que se traduzem no aquecimento global.

Os veículos autônomos apresentam inúmeras vantagens, sendo uma delas o controle de velocidade, que foi estudado nesta tese. Tal como foi referido, serão usados três tipos de motorizações com diferentes técnicas de controle, testando assim o controle de velocidade para cada um dos casos.

Tendo em conta as vantagens mencionadas, torna-se assim interessante o estudo sobre esta área e a aposta nestes veículos inovadores.

1.2. Contribuições

Com a realização da presente dissertação pretende-se fazer um estudo comparativo dos diferentes tipos de motores para os veículos elétricos. Através do estudo da dinâmica do veículo, dos motores elétricos e dos seus métodos de controle, pretende-se estudar o desempenho do veículo em diferentes situações de estrada de modo a compreender qual o melhor tipo de motor a ser usado.

1.3. Estado da Arte

Um motor elétrico é uma máquina que transforma energia elétrica em mecânica. É o tipo de motor mais utilizado, devido às vantagens da energia elétrica, do seu baixo custo, controle e construção simples e apresenta melhores rendimentos em relação ao motor CI.

Com o crescimento cada vez maior da população mundial, o número de veículos rodoviários irá também aumentar. Sendo grande parte dos veículos propulsionados por motores CI e sendo o petróleo uma fonte cada vez mais limitada, é necessário assim encontrar alternativas. Para além disso, os veículos com motores CI emitem gases que poluem o meio ambiente e provocam o aquecimento global do planeta [4].

Hoje em dia, a proteção ambiental e a limitação do petróleo são problemas cada vez mais importantes. Desta forma, têm sido desenvolvidos veículos elétricos com o objetivo de responderem a estes problemas, proporcionando um meio de transporte que não emite gases poluentes, diminuindo

assim a poluição ambiental. Atualmente, a venda de veículos elétricos já é algo comum, oferecendo estes um serviço seguro, eficiente e amigo do ambiente [4].

Os primeiros veículos elétricos foram desenvolvidos em França e Inglaterra nos finais da primeira década do séc. XIX. Um dos primeiros modelos elétricos foi o Phaeton, construído pela empresa *Woods Motor Vehicle* em 1902 e custava 2000 dólares. Apresentava uma autonomia de 29 km e uma velocidade máxima de 22 km/h. Os veículos elétricos tiveram durante algum tempo os records de velocidade e autonomia nos inícios de 1900. Um dos mais notáveis registos foi a quebra da barreira de velocidade dos 100 km/h, por *Camille Jenatzy*, no dia 29 de Abril de 1899, no seu veículo em forma de foguete, *Jamais Contente*, que conseguiu uma velocidade máxima de 105.88 km/h [21].

No início do século XX, o desenvolvimento da indústria automóvel foi enorme e já existiam veículos elétricos, veículos a gasolina e veículos a vapor. Os veículos elétricos eram os mais populares, uma vez que não apresentavam cheiro, vibrações, ruído e não necessitavam de mudanças. Em 1910, o preço normal dos veículos era cerca de 1000 dólares, enquanto que o dos veículos elétricos era 3000 dólares, dado o nível de sofisticação do seu interior.

O veículo elétrico sofreu a concorrência do motor a combustão desde o início do século XX. Apesar de ter sempre estado, tecnologicamente, bem à frente em termos de eficiência, sofria do problema da autonomia, do tempo de carregamento e do preço das baterias.

O desaparecimento do veículo elétrico aconteceu por volta da década de 1930 e voltou a aparecer nas décadas de 1960 e 1970 devido à crise do petróleo e à necessidade de encontrar alternativas ao uso da gasolina. A evolução até ao presente tem sido também grande parte, devido a regulamentos e medidas internacionais para a redução das emissões de gases de efeito estufa. As questões ambientais podem muito bem ser o facto decisivo na adoção de veículos elétricos na cidade.

Durante a última parte do século XX, houveram mudanças que podem tornar os veículos elétricos uma proposta mais atraente. Em primeiro, há preocupações crescentes sobre o meio ambiente, tanto em termos de emissões globais de dióxido de carbono, como também, a emissão local de gases de escape, que ajudam a tornar as cidades populosas e desagradáveis para se viver. Em segundo, houveram desenvolvimentos técnicos na conceção dos veículos e melhoramentos nas baterias recarregáveis, nos motores e controladores.

Nos motores CI, 85% da energia consumida é perdida devido ao calor provocado pelo funcionamento do motor, enquanto que nos motores elétricos é bastante comum obter rendimentos superiores a este valor. Os veículos elétricos apresentam ainda outras vantagens, como por exemplo, obtenção do valor máximo do binário e facilidade de controlo do mesmo, recorrendo à eletrónica de potência.

Existem já vários tipos de motores elétricos concebidos para integração nestes veículos, sendo que os motores CA (em comparação com os motores CC) são preferencialmente utilizados nos dias de hoje. No grupo dos motores elétricos CA, os motores de indução (assíncronos) e os motores de magnetos permanentes são aqueles que têm sido alvo de maior atenção na atualidade [6].

Enquanto o motor CA é mais barato e mais leve, o motor CC tem um controlador mais simples, o que reduz o custo da combinação motor/controlador. A principal desvantagem do motor CA é o custo do seu controlador (o que o acaba por tornar uma opção mais cara, em relação ao motor CC). Na Tabela 1.1 pode-se ver a comparação entre alguns aspetos dos motores CA e CC.

Tabela 1.1 - Comparação dos motores AC e CC ([2]).

Motor CA	Motor CC
Transmissão de velocidade única	Transmissão de várias velocidades
Peso mais leve	Mais pesado que o motor AC (para a mesma potência)
Mais barato	Mais caro
95% de eficiência em plena carga	85-95% de eficiência em plena carga
Controlador mais caro	Controlador mais simples (e barato)
Motor/Controlador/ Inversor mais caro	Motor/Controlador mais barato

Para controlar a velocidade nos veículos elétricos, é necessário aplicar técnicas de controlo aos motores de modo a obter-se a velocidade pretendida.

Nos motores de corrente contínua, a velocidade é diretamente proporcional à tensão. De modo a controlar a tensão e a corrente, são usados conversores eletrónicos de potência. Existe uma grande variedade de conversores, operando cada um em determinados quadrantes. É importante operar nos diferentes quadrantes, uma vez que é necessário obter correntes e tensões negativas também, de modo a que o veículo efetue manobras como a travagem e imobilização do veículo (através de um travão mecânico). A tensão a ser aplicada pode ser indicada por um controlador PID, que consoante a velocidade pretendida, indica um valor de tensão a aplicar.

Nos motores assíncronos existem várias técnicas para controlar o acionamento, sendo as mais populares as que utilizam os inversores de potência. Quanto ao controlo dos inversores de potência,

existem essencialmente duas técnicas. Uma mais simples é designada por controlo escalar tensão/frequência, utilizada em controlo de malha aberta. A outra, é designada por controlo por orientação de campo/controlo vetorial, mais apropriada para o controlo em malha fechada.

O controlo escalar é baseado no modelo em regime permanente da máquina assíncrona, sendo efetuado pela variação de amplitude das variáveis de controlo, contrastando com o controlo vetorial, onde quer o módulo quer a fase dos vetores são variáveis de controlo [22].

Utilizando o método de controlo por orientação de campo, a máquina assíncrona passa a ser controlada de maneira semelhante a um motor CC com excitação independente, permitindo o controlo independente do fluxo e do binário.

Para além destas duas técnicas, tem-se também o controlo direto do binário e do fluxo para controlar os motores assíncronos. Os princípios deste método podem ser enunciados como [22]:

- Fluxo do estator é um integral no tempo da força eletromotriz do estator. Assim sendo, a sua amplitude depende bastante da corrente do estator;
- O binário desenvolvido é proporcional ao seno do ângulo entre o estator e os vetores de fluxo do rotor;
- A reação do fluxo do rotor a alterações na tensão do estator é mais lenta do que a do fluxo do estator.

Consequentemente, tanto a amplitude do fluxo do estator e do binário desenvolvido, podem ser controlados diretamente pela seleção adequada de vetores espaciais no estator [22].

O Controlo Direto de Binário apresenta vantagens importantes em relação ao Controlo por Orientação de Campo. Com este método de controlo tem-se uma estrutura mais simples, uma menor dependência dos parâmetros do motor e um melhor comportamento em regime permanente e em regime transitório. O fluxo e o binário são controlados diretamente, sem recorrer à transformada de Blondel-Park, à regulação de grandezas intermédias ou a modulações específicas, sendo as correntes e as tensões controladas de forma indireta. Todavia, tem uma frequência de comutação variável e apresenta dificuldades no controlo do binário para velocidades muito baixas, o que é um fator prejudicial para o controlo dos veículos elétricos [23].

Em relação aos motores síncronos de magnetos permanentes, pode ser usado também o controlo por orientação de campo e o controlo direto de binário. Para além destas duas técnicas já descritas, uma outra técnica também usada no controlo deste motor é o controlo de corrente retangular (six-step control). Este método é normalmente usado nos motores síncronos de magnetos permanentes devido à forma trapezoidal das suas forças contra eletromotrizes. Neste controlo, é de extrema importância saber a posição em que o rotor se encontra. Para isso, são usados sensores de Hall que estão acoplados

ao estator, que irão determinar em que setor este se encontra. Depois disso, serão ativados os semicondutores que comandam a ordem de movimento do rotor (que pode ser no sentido dos ponteiros do relógio ou no sentido contrário), consoante o binário pretendido [18].

1.4. Organização da Dissertação

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos. No primeiro capítulo é apresentado um enquadramento do tema abordado incluindo a problemática deste trabalho, assim como a definição de objetivos e metodologias utilizadas.

No segundo capítulo é realizado um estudo sobre a dinâmica do veículo, apresentando todas as forças a que este é sujeito e a influência que elas provocam, verificando também o efeito causado por curvas e rampas sobre ele.

No terceiro capítulo é apresentado o modelo dinâmico do motor de corrente contínua (sem conversor eletrónico) em conjunto com a dinâmica do veículo, e a técnica de controlo usada para controlar a velocidade. São ainda apresentados os resultados do comportamento do veículo a realizar um pequeno percurso, sendo sujeito a diferentes velocidades e inclinações.

No quarto capítulo é apresentado o modelo dinâmico do motor de corrente contínua, mas desta vez com o conversor eletrónico, em conjunto com a dinâmica do veículo, apresentando depois os resultados das simulações para o percurso efetuado. Também são estudados os motores assíncrono e síncrono de magnetos permanentes, e as técnicas de controlo usadas para cada um. Por fim, são apresentadas as simulações dos métodos de controlo estudados. De realçar a simulação do controlador de corrente retangular e a simulação com controlo vetorial.

Por último, no quinto capítulo são apresentadas as principais conclusões tiradas ao longo da dissertação.

2. Dinâmica do Veículo

Este capítulo tem como objetivo apresentar todas as forças que atuam sobre o veículo e os referenciais usados no seu estudo (referencial fixo na estrada e referencial fixo no veículo). São consideradas as forças exercidas sobre os pneus durante o seu movimento ao longo de várias fases do veículo em movimento (arranque, andamento e travagem).

Através da ferramenta *Matlab*, pretende-se desenvolver um modelo matemático que represente a dinâmica de um veículo, permitindo simular o seu comportamento ao longo do seu percurso em estrada, em diferentes situações, tais como, curvas e inclinações. O modelo global dinâmico apresentado destina-se a um veículo de tração elétrica com um motor elétrico associado às duas rodas motrizes (rodas traseiras).

2.1. Sistema de coordenadas

Para o referencial fixo na estrada, X, Y e Z designam as três direções: X e Y definem o plano horizontal (fazem entre si um ângulo de 90°) e Z é a direção vertical. Na Figura 2.1 pode-se observar o referencial fixo na estrada.

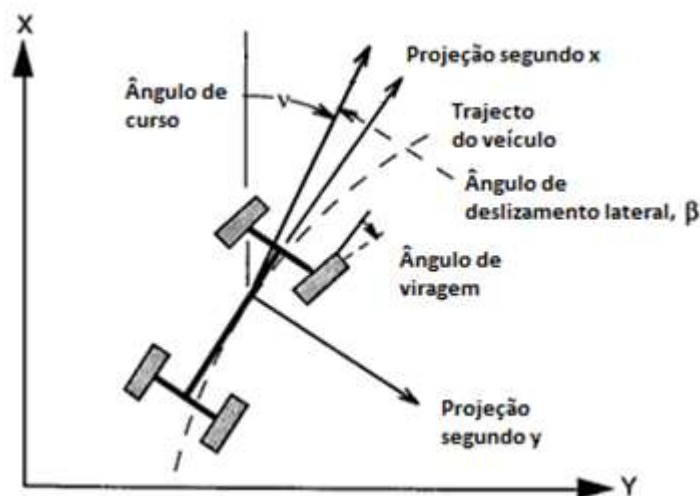


Figura 2.1 - Sistema de coordenadas do veículo fixo na terra [8].

em que cada variável representa:

X: movimento longitudinal;

Y: movimento lateral;

Z: movimento vertical;

v : ângulo de curso entre o eixo X e o vetor velocidade do veículo;

β : ângulo de deslizamento lateral entre o vetor velocidade do veículo e o eixo x;

2.2. Forças aplicadas no veículo

O primeiro passo na modelação da dinâmica do veículo é criar uma equação que traduza a tração do veículo. Esta é a força de propulsão do veículo para a frente, transmitida ao solo através das rodas motrizes.

Considera-se um veículo de massa m , com uma velocidade v , numa rampa com um ângulo de inclinação θ , ilustrado na Figura 2.2. Tendo em conta o referencial do veículo, procede-se depois ao estudo de todas as forças que sobre ele atuam e que se opõem ao seu movimento. Estas forças são, a força de resistência ao rolamento dos pneus no contacto pneu-estrada, F_{RR} , a força de resistência aerodinâmica, F_{DA} e a força de inclinação devido ao plano inclinado da estrada, F_I . Ambas as forças (F_{DA} e F_I) podem ser a favor ou contra o movimento, consoante a direção do vento e a inclinação da via, sendo este estudo demonstrado no subcapítulo 2.2.1. As forças mencionadas podem ser observadas na Figura 2.2.

De seguida, será feito um estudo pormenorizado das causas e efeitos destas forças num veículo ligeiro.

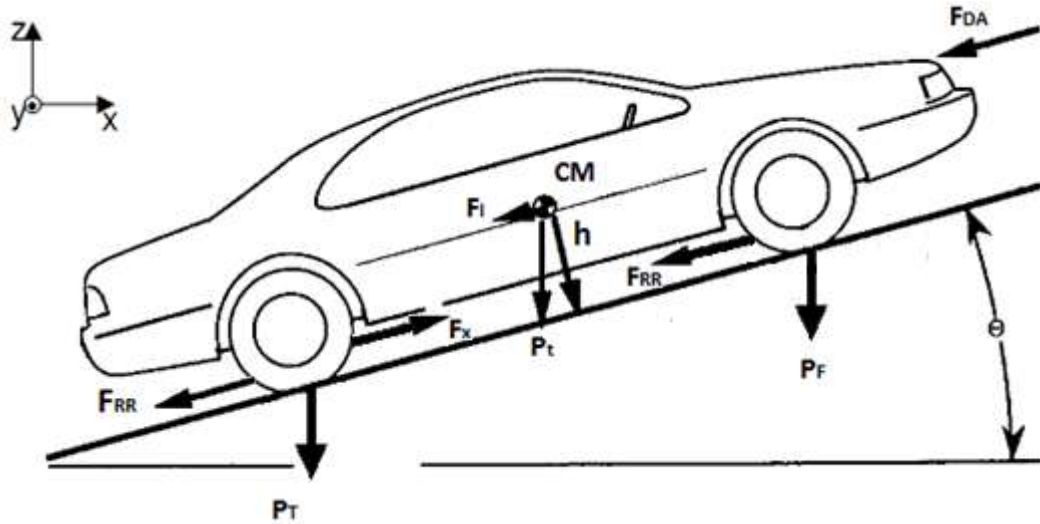


Figura 2.2 - Forças aplicadas no veículo (adaptado de [8]).

2.2.1. Força Total de Resistência ao movimento do veículo

Somando todas as forças resistentes que atuam no veículo, isto é, a força resistente ao rolamento dos pneus (F_{RR}), a força de resistência aerodinâmica (F_{DA}) e a força de inclinação (F_I), obtém a força total de resistência ao movimento do veículo (F_R), que é dada pela equação (2.1) [7]:

$$F_R = F_{RR} + F_{DA} + F_I = f_r \cdot m \cdot g + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A_f \cdot V_V^2 + m \cdot g \cdot \sin(\theta) \quad (2.1)$$

Na Figura 2.3, pode-se verificar que a baixa velocidade, a resistência ao rolamento F_{RR} é a força mais resistente ao movimento do veículo. Conforme a velocidade vai aumentando, a força de resistência aerodinâmica torna-se a força mais resistente ao movimento no veículo (daí a importância em tentar reduzir esta força). Como o ângulo de inclinação é nulo, a força de inclinação também é zero, tal como se pode verificar.

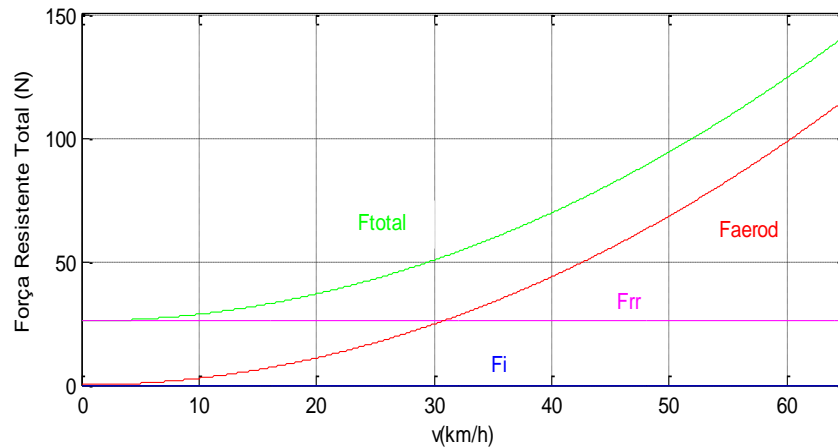


Figura 2.3 - Força total de resistência para $\theta = 0$.

Na Figura 2.4, pode-se verificar a força de inclinação para um ângulo diferente de zero (numa subida). A força devido à inclinação da estrada (F_i) é independente da velocidade a que o veículo se desloca e do tipo de piso, dependendo apenas do ângulo de inclinação da estrada e da massa do veículo. Neste caso, a força mais resistente ao movimento do veículo no arranque é a força de inclinação, sendo depois a força de resistência aos rolamentos a segunda força mais resistente ao veículo. Mais uma vez, conforme a velocidade do veículo aumenta, a força mais resistente ao movimento é a força de resistência aerodinâmica.

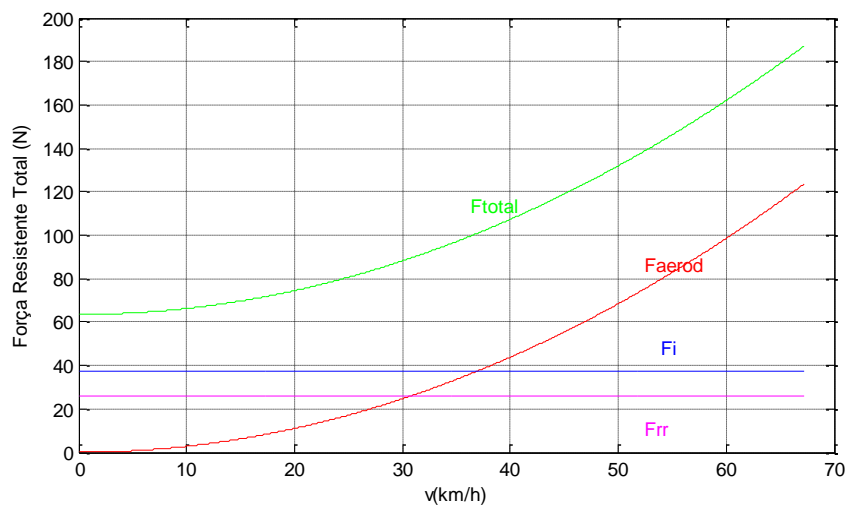


Figura 2.4 - Força total de resistência para $\theta \neq 0$.

2.2.2. Força Resistente ao Rolamento do pneu

Para os casos estudados, considera-se sempre que todas as rodas do veículo estão no mesmo piso, obtendo-se assim a equação (2.2):

$$F_{RR} = f_r \cdot m \cdot g \quad (2.2)$$

A Tabela 2.1 apresenta o coeficiente de atrito ao rolamento nos pneus em vários tipos de piso.

Tabela 2.1 - Coeficientes de resistência ao rolamento [9].

Tipo de piso	f_r
Cimento	0.008 - 0.01
Asfalto	0.01 - 0.015
Calçada	0.033 - 0.055
Areia	0.15 - 0.300
Neve	0.025 - 0.037

2.2.3. Força de Resistência Aerodinâmica

A Força de Resistência Aerodinâmica é calculada através da equação (2.3). Esta força resulta devido ao atrito provocado entre a interação do veículo com o vento, podendo ser a favor ou contra o movimento do veículo (consoante a sua direção).

$$F_{DA} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A_f \cdot V_V^2 \quad (2.3)$$

sendo ρ a densidade do ar, C_D o coeficiente de resistência aerodinâmico, A_f a área frontal do veículo e V_V a velocidade do veículo em relação ao vento.

Na Figura 2.5 é possível verificar a variação do coeficiente de resistência aerodinâmica, consoante a parte da frente do veículo.

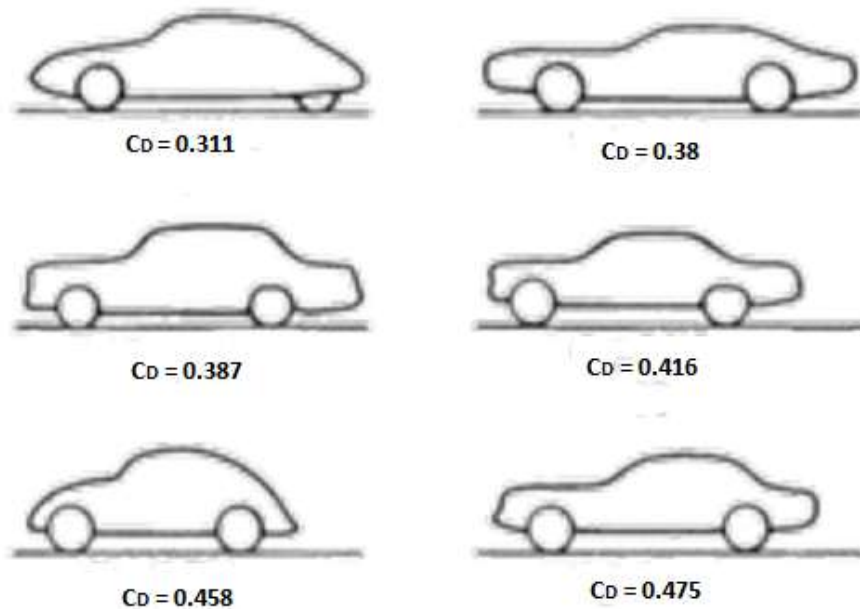


Figura 2.5 - Coeficientes de resistência aerodinâmica [9].

2.2.4. Força de Inclinação da estrada

A Força de Inclinação da estrada é calculada pela equação (2.4):

$$F_I = m \cdot g \cdot \text{sen}(\theta) \quad (2.4)$$

sendo m a massa do veículo, g a constante gravitacional e θ a inclinação da estrada. Tal foi referido anteriormente, esta força pode ser a favor ou contra o movimento do veículo, consoante a inclinação do ângulo θ .

2.3. Equações do movimento

2.3.1. Dinâmica do motor elétrico

A dinâmica do motor elétrico pode ser representada pela equação (2.5):

$$J_{Vt} \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_r \quad (2.5)$$

sendo J_{Vt} o momento de inércia total do veículo visto pelo motor, ω_m a velocidade angular do motor, T_m o binário do motor e T_r o binário resistente. Reordenando a equação (2.5) e integrando em ordem ao tempo, obtém-se:

$$\omega_m = \int \frac{T_m - T_r}{J_{Vt}} dt \quad (2.6)$$

De modo a obter a velocidade angular da roda, ω_r , é necessário fazer a relação entre a velocidade angular do motor com o valor da sua caixa redutora, i_{cx} (1:5), obtendo assim a equação (2.7):

$$\omega_r = \frac{\omega_m}{i_{cx}} \quad (2.7)$$

O binário resistente no referencial do motor é dado pela equação (2.8), sendo r_e o raio efetivo da roda e F_{RT} a força de resistência ao rolamento total.

$$T_r = \frac{r_e}{i_{cx}} \cdot F_{RT} \quad (2.8)$$

O momento de inércia da roda J_ω é expresso pela equação (2.9) e J_V pela equação (2.10):

$$J_\omega = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{r_e}{i_{cx}}\right)^2 \cdot m_\omega \quad (2.9)$$

$$J_V = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(\frac{r_e}{i_{cx}}\right)^2 \cdot (1 - \lambda) \quad (2.10)$$

Fazendo o somatório do momento de inércia do motor, com o momento de inércia da roda e o momento de inércia da massa do veículo, obtém-se o momento de inércia total do veículo J_{Vt} , que pode ser calculado através da equação (2.11):

$$J_{Vt} = J_m + J_\omega + J_V \quad (2.11)$$

2.3.2. Dinâmica do pneu

Ao longo do percurso de um veículo, os seus pneus sofrem várias deformações. No arranque e na travagem estas deformações são maiores, fazendo com que o veículo ou as suas rodas possuam por instantes, uma velocidade superior em relação ao outro. Esta diferença de velocidade entre os dois é dada pelo escorregamento longitudinal da roda, e é representado pela equação (2.12):

$$\lambda = \frac{V_\omega - V_V}{V_\omega} = \frac{\omega_r r_e - V_V}{\omega_r r_e} \quad (2.12)$$

sendo V_ω a velocidades das rodas e V_V a velocidade de deslocamento do veículo.

Aplicação da Fórmula de Pacejka

As curvas de *Pacejka* representam as forças que são geradas pelo pneu durante o movimento de um veículo. *Pacejka* desenvolveu uma série de modelos de design de pneus ao longo dos últimos anos

[1]. A Fórmula Mágica descreve o comportamento do pneu em função do escorregamento, do peso que suporta e do tipo de piso. Foram denominadas de "fórmula mágica", porque não possuem qualquer base física em particular para a estrutura das equações escolhidas, mas encaixam-se numa grande variedade de construções de pneus e condições de funcionamento.

Força Longitudinal

A equação (2.13) representa a força longitudinal que o pneu desenvolve em função do seu escorregamento longitudinal (sendo as constantes B, C, D, E, S_h e S_v obtidas experimentalmente) [1].

$$F_x = D_x \cdot \text{sen}(C_x \cdot \text{tg}^{-1}(B_x \cdot \phi_x)) + S_{vx} \quad (2.13)$$

$$\phi_x = (1 - E_x)(\lambda + S_{vx}) + \frac{E_x}{B_x} \text{tg}^{-1}(B_x((\lambda + S_{vx}))) \quad (2.14)$$

Para a situação em que o veículo se encontra em aceleração, escorregamento positivo (ou seja, com a velocidade das rodas superior à do veículo), as constantes do pneu são dadas em função do peso que este suporta (P_{pneu}), através de (2.15):

$$\begin{cases} B_x = 19 + 1.55 * 10^{-3} * P_{pneu} \\ C_x = 1.47 - 6.25 * 10^{-5} * P_{pneu} \\ D_x = -29.28 + 1.046 * P_{pneu} \\ E_x = -3.6 \\ S_{hx} = S_{vx} = 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

Quando o veículo realiza uma travagem, obtém-se um escorregamento negativo (velocidade do veículo superior à das rodas), sendo as constantes do pneu dadas através de (2.16):

$$\begin{cases} B_x = 17.48 + 2.32 * 10^{-3} * P_{pneu} \\ C_x = 1.47 - 6.2 * 10^{-5} * P_{pneu} \\ D_x = -297.28 + 1.046 * P_{pneu} \\ E_x = 0.1 \\ S_{hx} = S_{vx} = 0 \end{cases} \quad (2.16)$$

Força Lateral

A força lateral desenvolvida pelo pneu é expressa em função do ângulo de escorregamento lateral do pneu pela equação (2.17):

$$F_y = D_y \cdot \text{sen} \left(C_x \cdot \text{tg}^{-1} (B_y \phi_y) \right) + S_{vy} \quad (2.17)$$

$$\phi_y = (1 - E_y) (\alpha + S_{hy}) + \frac{E_y}{B_y} \text{tg}^{-1} (B_y (\alpha + S_{hy})) \quad (2.18)$$

As constantes B, C, D, E, S_h e S_v são obtidas experimentalmente e dependem do tipo de pneu e do peso que se exerce sobre este.

$$\begin{cases} B_y = 17.48 + 2.32 * 10^{-3} * P_{pneu} \\ C_y = 1.47 - 6.2 * 10^{-5} * P_{pneu} \\ D_y = -297.28 + 1.046 * P_{pneu} \\ E_y = 0.1 \\ S_{hy} = S_{vy} = 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

Na Figura 2.6 é possível verificar a força longitudinal (F_x) exercida sobre o pneu, desde o arranque até atingir uma velocidade de 5 m/s (numa trajetória retilínea). A massa distribuída por cada pneu é de 300 kg (sendo a massa do veículo 1200 kg). Uma vez que o percurso efetuado apresenta uma trajetória retilínea, a força lateral (F_y) é igual a 0. As rodas motrizes serão analisadas como uma só, sendo a força obtida, a força total nas duas rodas.

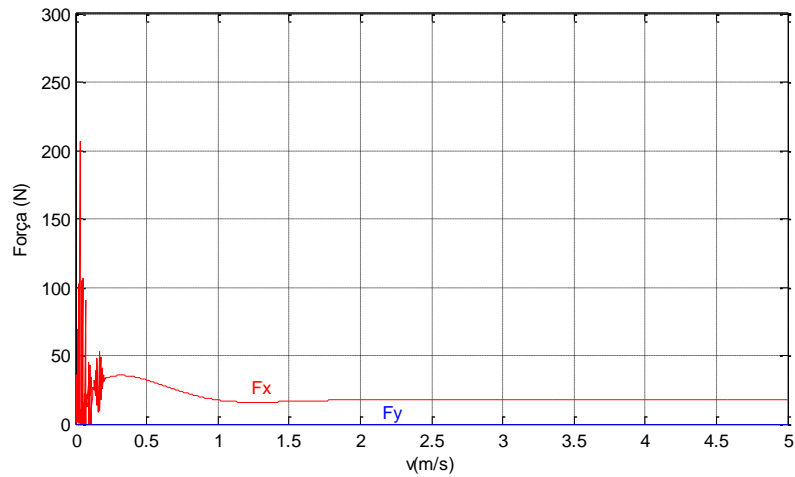


Figura 2.6 - Força longitudinal.

Como se pode verificar, no arranque é necessária uma força maior, de modo a fazer o veículo vencer as forças de atrito estático e deste modo começar a mover-se. Dada a trajetória do veículo, a sua força lateral é igual a zero.

Na Figura 2.7 pode-se verificar a força longitudinal e lateral do veículo, com um ângulo de direção de 5° . Mais uma vez, pode-se verificar o grande valor das forças no início para fazerem o carro arrancar. Neste caso, como o ângulo de direção é diferente de zero, já se obtêm valores para força lateral (caso contrário, seguia numa trajetória retilínea, como no caso anterior).

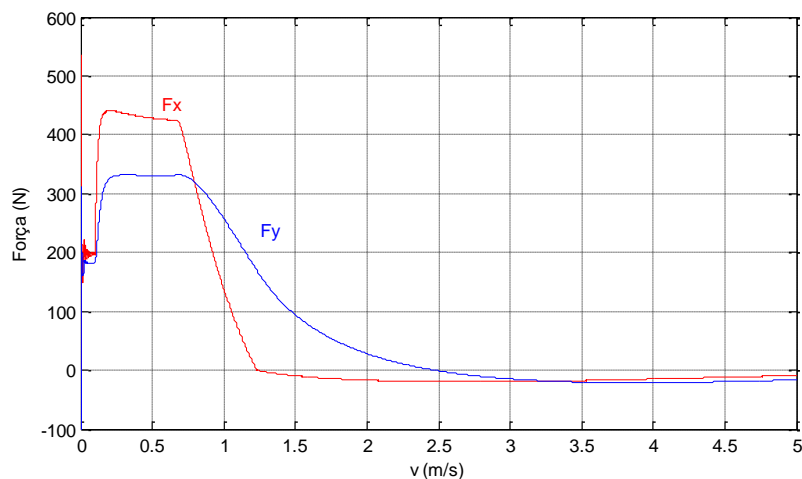


Figura 2.7 - Força lateral e longitudinal.

A Figura 2.8 ilustra o diagrama de blocos do modelo dinâmico do pneu, tendo como entradas a velocidade linear da roda, a velocidade do veículo, a velocidade de rotação em torno do seu centro de massa e o ângulo de direção (que é para as rodas da frente). Como saídas, tem as forças longitudinal e lateral desenvolvidas, que são obtidas através das equações (2.13) e (2.17) (fórmula de Pacejka).

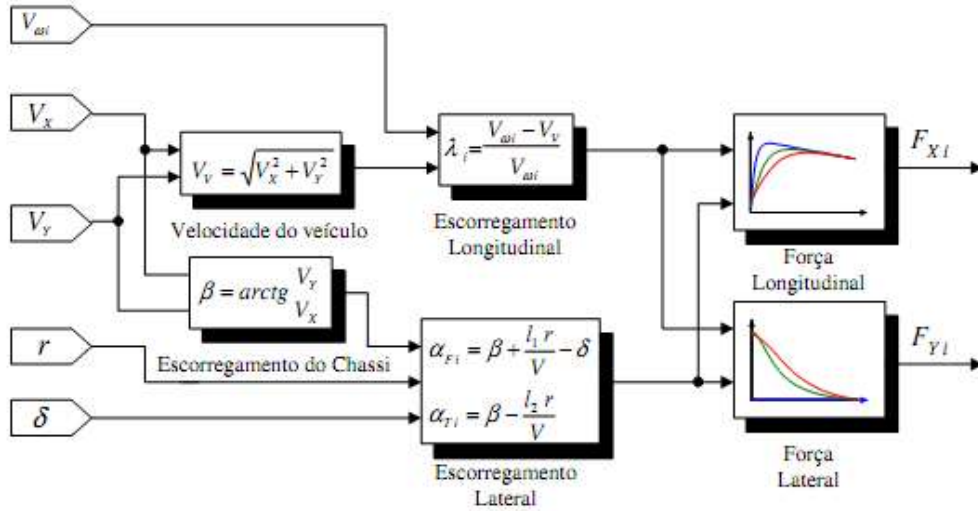


Figura 2.8 - Diagrama de blocos da dinâmica do pneu [7].

A velocidade da roda V_{ω} , é obtida através do produto do raio efetivo da roda r_e , pela velocidade angular da roda, ω_r . As velocidades V_x e V_y são as componentes longitudinal e lateral da velocidade do veículo V_v , que serão estudadas no próximo subcapítulo, da dinâmica do veículo. A variável δ corresponde ao ângulo de direção das rodas (que diz respeito às rodas da frente) e r à velocidade de rotação em torno do centro de massa, que também é apresentada no próximo subcapítulo (equações (2.24) e (2.25)). O escorregamento longitudinal é dado pela equação (2.12). O escorregamento lateral dos pneus da frente α_{fi} , pode ser representado pela equação (2.20):

$$\alpha_{fi} = \beta + \frac{l_1 \cdot r}{V} - \delta \quad (2.20)$$

e dos pneus de trás, pela equação (2.21):

$$\alpha_{rfi} = \beta + \frac{l_2 \cdot r}{V} \quad (2.21)$$

sendo β o escorregamento do chassi do veículo, l_1 a distância entre o eixo da frente e o centro de massa e l_2 a distância entre o eixo traseiro e o centro de massa.

2.3.3. Dinâmica do veículo

A segunda lei de Newton faz uma relação entre a resultante das forças aplicadas num corpo com a aceleração. A resultante das forças aplicadas sobre um corpo é igual ao produto da sua massa (m), pela aceleração adquirida (a), e é descrita pela equação (2.22):

$$\sum_{i=1}^n F_i = m \cdot a \quad (2.22)$$

A soma dos binários que atuam num corpo sobre um dado eixo é igual ao produto da sua aceleração angular pelo momento de inércia sobre esse eixo, equação (2.23):

$$\sum_{j=1}^m T_j = J \cdot \alpha \quad (2.23)$$

A Figura 2.9 ilustra as forças desenvolvidas através do contacto pneu-estrada nas rodas e as velocidades referenciadas ao centro de massa do veículo.

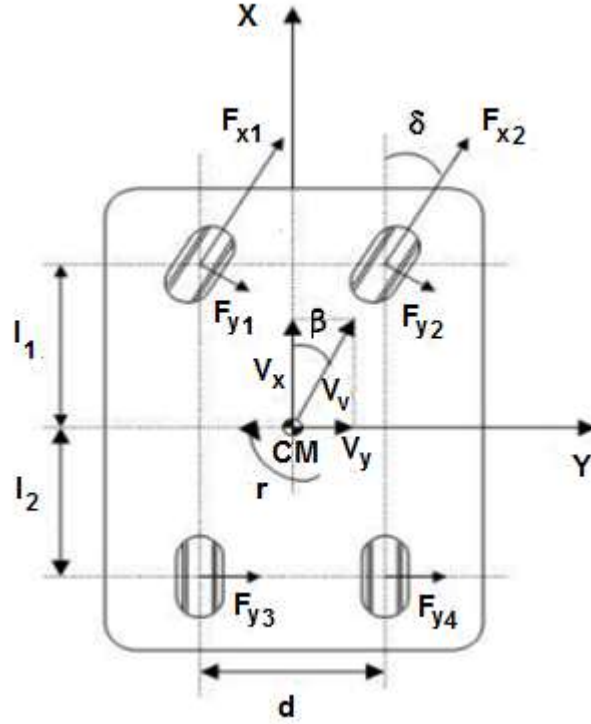


Figura 2.9 - Diagrama de forças aplicadas sobre o veículo (adaptado de [7]).

Partindo das equações da 2ª Lei de Newton pode-se escrever as equações do movimento do veículo nas três direções do referencial fixo neste [7]:

$$m(\dot{V}_x - V_y r) = F_{x1} \cos \delta + F_{x2} \cos \delta - F_{y1} \sin \delta - F_{y2} \sin \delta - \frac{1}{2} \rho C_D A_f V_V^2 - m g \sin \theta \quad (2.24)$$

$$m(\dot{V}_y - V_x r) = F_{y1} \cos \delta + F_{y2} \cos \delta + F_{y3} + F_{y4} + F_{x1} \sin \delta - m \frac{V_V^2}{R} \quad (2.25)$$

onde $F_c = m \frac{V_V^2}{R}$ representa a força centrífuga no centro de massa do veículo. Esta força só existe em movimentos curvilíneos, influenciando apenas nas situações testadas com curvas [7].

$$I_z \dot{r} = l_1(F_{y1} + F_{y2}) \cos \delta - l_2(F_{y3} + F_{y4}) + l_1(F_{x1} + F_{x2}) \sin \delta + \\ + \frac{d}{2}(F_{x1} - F_{x2}) \cos \delta + \frac{d}{2}(-F_{y1} + F_{y2}) \quad (2.26)$$

sendo:

- F_{x1} e F_{x2} : Forças nas rodas segundo a direção X ;
- F_{y1} , F_{y2} , F_{y3} e F_{y4} : Forças nas rodas segundo a direção Y ;
- l_1 : Distância entre o eixo da frente e o CM;
- l_2 : Distância entre o eixo traseiro e o CM;
- d : Distância entre as rodas da direita e da esquerda;
- δ : Ângulo da direção das rodas;
- β : Escorregamento do chassi e do veículo;
- r : Velocidade de rotação em torno do CM;
- V_x : Velocidade segundo X ;
- V_y : Velocidade segundo Y ;
- V_V : Velocidade do veículo;
- a_x : Aceleração lateral do veículo;
- a_y : Aceleração longitudinal do veículo;
- m : Massa total do veículo;

3. Modelo completo de simulação (veículo e motor)

Este capítulo tem como objetivo apresentar e explicar detalhadamente, o modelo completo de simulação do conjunto motor e veículo implementado, como também a técnica de controlo usada (tendo sido usada uma técnica diferente para cada motor). Para esta situação, optou-se por um motor CC com um acionamento ideal, considerando um modelo simplificado do motor e sem o conversor eletrónico de potência.

No próximo capítulo será também simulado com a dinâmica do veículo o motor CC com o conversor eletrónico, o motor assíncrono e síncrono de magnetos permanentes.

De modo a usar o motor CC e conseguir controlá-lo para o veículo elétrico é necessário fazer um estudo do seu funcionamento e das suas técnicas de controlo.

3.1. Modelo simplificado de um motor de Corrente Contínua

O motor de corrente contínua é composto por duas estruturas magnéticas, que são o estator (enrolamento de campo) e o rotor (enrolamento do induzido). O estator é composto por uma estrutura ferromagnética com pólos salientes nos quais são enroladas as bobinas que criam o campo magnético (quando percorridas por corrente elétrica). Na Figura 3.1 é possível observar algumas características físicas do motor CC.

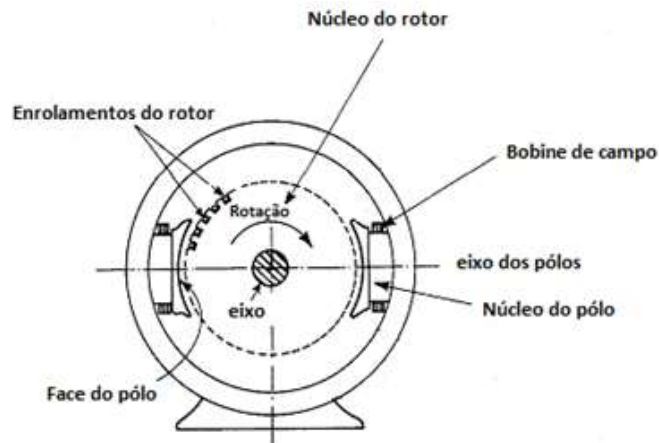


Figura 3.1 - Características de um motor CC (adaptado de [12]).

A velocidade destes motores é facilmente controlada, variando a tensão de alimentação do motor, e, devido ao seu simples método de controlo, estes motores têm sido bastante utilizados em veículos elétricos. No entanto, estes motores apresentam algumas desvantagens: são volumosos, têm baixa eficiência, baixa fiabilidade e necessitam de bastante manutenção devido ao coletor e às escovas [6].

3.1.1. Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento do motor CC, tal como o de qualquer outra máquina elétrica, baseia-se na indução eletromagnética. A força eletromotriz induzida nos enrolamentos é alternada, mas é retificada mecanicamente ao ser ligada ao exterior da máquina. A força eletromotriz induzida num só condutor é dada pela equação (3.1):

$$e = B \cdot l \cdot v \quad (3.1)$$

sendo:

e = força eletromotriz [V]

B = densidade do campo magnético [Wb/m^2]

v = componente perpendicular da velocidade [m/s]

l = comprimento do fio [m]

3.1.2. Equações do motor CC

Inicialmente, foi usado um motor CC com excitação independente de modo a realizar o estudo do seu funcionamento em conjunto com um veículo. Para este caso, em relação ao motor, pretende-se principalmente estudar a evolução da sua corrente, binário e velocidade para diferentes tipos de percurso. Sabe-se que o binário eletromagnético do motor CC é determinado pela equação (3.2) [28]:

$$T_e = k \cdot i_f \cdot i_a \quad (3.2)$$

sendo k a constante de conversão eletromecânica de energia, i_f a corrente de campo e i_a a corrente do induzido.

A Figura 3.2 representa o diagrama esquemático de um motor de corrente contínua de excitação independente, sendo L_a a indutância do induzido, R_a a resistência do induzido, L_f a indutância de campo e R_f a resistência de campo.

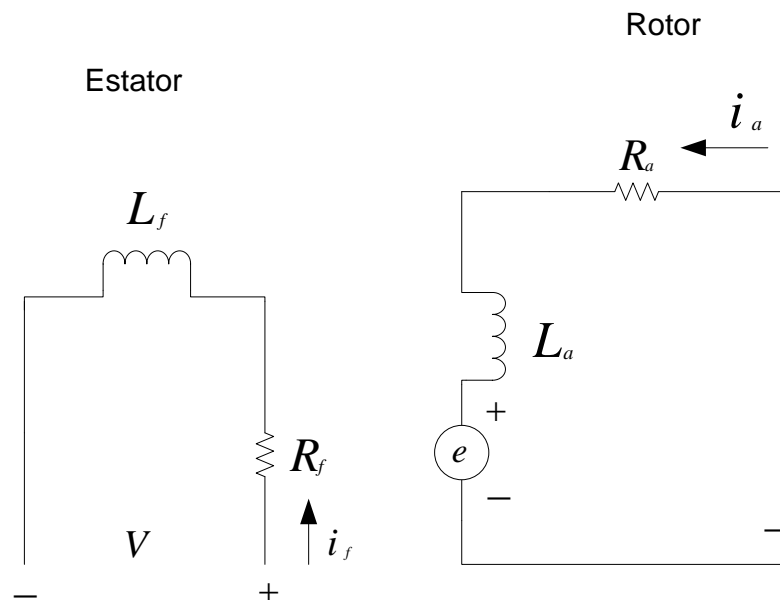


Figura 3.2 – Diagrama esquemático do motor CC com excitação independente.

O circuito da induzido do motor é representado pela equação (3.3):

$$v = e + i_a \cdot R_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} \quad (3.3)$$

Considerando a corrente de campo constante, obtém-se a força eletromotriz representada pela equação (3.4):

$$e = k_\omega \cdot \omega_m \quad (3.4)$$

sendo k_ω uma constante de velocidade e ω_m a velocidade angular do motor.

Através da equação do circuito do induzido do motor CC irá obter-se a corrente do induzido, que servirá depois também para determinar o binário eletromagnético.

3.1.3. Conversor CC-CC

O acionamento da máquina de corrente contínua pode ser definido no plano binário – velocidade em quatro zonas de operação, ilustrado na Figura 3.3.

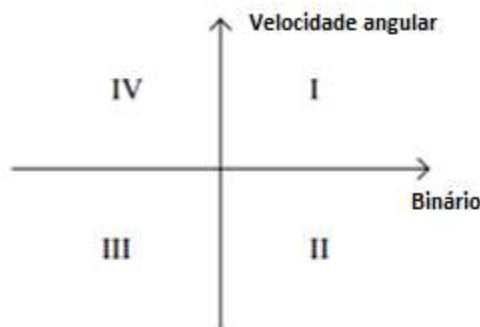


Figura 3.3 - Zonas de operação do motor CC.

No quadrante I tem-se binário e velocidade positivos, o que significa que a máquina está a funcionar como motor e a rodar num dado sentido. Em termos de tração, pode-se dizer que está a operar no sentido positivo do eixo x (ou seja, movimento em frente).

No quadrante III, o binário como a velocidade são ambos negativos, o que resulta numa operação de aceleração no sentido inverso (para trás).

O quadrante II caracteriza-se por um movimento contrário (velocidade negativa) e binário positivo, implicando assim, uma travagem.

O quadrante IV, tem velocidade positiva e binário negativo, ou seja, travagem. Obtém-se assim um movimento de avanço, mas com redução na velocidade.

Na Tabela 3.1 pode verificar-se todos estes casos mencionados.

Tabela 3.1 - Quadrante de operação de um motor CC (adaptado de [13]).

Quadrante	Binário (I)	Velocidade (U)	Sentido de rotação	Variação da velocidade
I	> 0	> 0	Em frente	Acelera
II	> 0	< 0	Para trás	Desacelera
III	< 0	< 0	Para trás	Acelera
IV	< 0	> 0	Em frente	Desacelera

O conversor CC-CC converte uma tensão contínua em outra tensão contínua, mas de valor diferente. Uma vez que se pretende realizar todos os movimentos mencionados na Tabela 3.1, será necessário usar um conversor de 4 quadrantes, tal como o que se encontra ilustrado na Figura 3.4.

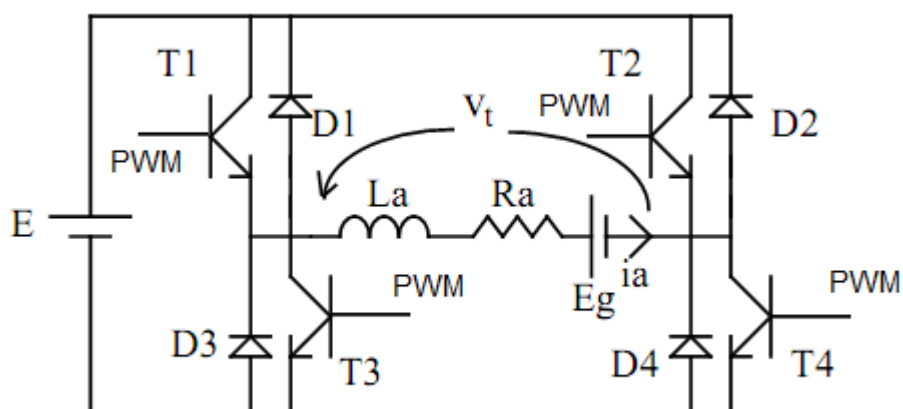


Figura 3.4 - Conversor operacional nos quatro quadrantes [13].

Ao aplicar o sinal de controlo PWM, ao mesmo tempo em T1 e T4, obtém-se o funcionamento nos quadrantes I e II. Quando o motor se encontra a rodar livremente, ou seja, sem PWM nos transístores, o retorno é feito pelos diodos D3 e D2. Da mesma maneira, com o acionamento do par T2 e T3, a zona de operação passa a ser nos quadrantes III e IV.

3.2. *Técnica de controlo do motor CC*

Já se viu neste capítulo que a velocidade de um motor CC é diretamente proporcional à tensão de alimentação do induzido. Assim sendo, será dimensionado um controlador PID que indicará a tensão necessária a aplicar ao motor, de modo a obter a velocidade (em m/s) pretendida.

O controlo PID é uma técnica de controlo de processos que une as ações proporcional, integral e derivativa, fazendo assim com que o sinal de erro seja minimizado pela ação proporcional, levado para zero pela ação integral e obtido com uma velocidade antecipada pela ação derivativa. A equação (3.5) representa o sinal de controlo do controlador PID:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.5)$$

onde $u(t)$ é o sinal de controlo, $e(t)$ é o erro entre a saída $y(t)$ e o valor de referência $r(t)$ e K_p , K_i e K_d são os ganhos proporcional, integral e derivativo do PID.

Aplicando a transformada de Laplace na equação (3.5) e considerando $K_i = \frac{K_p}{T_i}$ e $K_d = K_p \cdot T_d$, obtém-se a seguinte equação para o controlador:

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3.6)$$

em que T_i é o tempo de integral e T_d o tempo derivativo.

Ziegler e Nichols estabeleceram um conjunto de regras de sintonização de controladores PID que, apesar do reduzido amortecimento resultante, continuam a ser usadas como ponto de partida para um ajuste manual. O primeiro método analisa a curva de reação da instalação a um degrau unitário em anel-aberto, para determinar o conjunto de ganhos do controlador, tal como se ilustra na Figura 3.5:

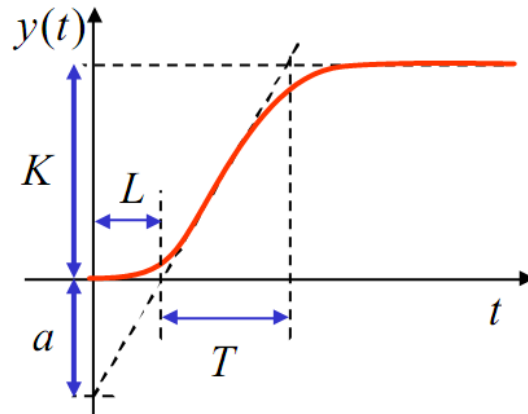


Figura 3.5 - Curva de reação da instalação a um degrau unitário [24].

sendo $a = K \frac{L}{T}$. Na Tabela 3.2 estão as fórmulas para dimensionar cada um dos ganhos dos controladores.

Tabela 3.2 - Dimensionamento do controlador PID [24].

$C(s)$	K_P	T_i	T_D
P	$\frac{1.0}{a}$	-	-
PI	$\frac{0.9}{a}$	3.3 L	-
PID	$\frac{1.2}{a}$	2.0 L	0.5 L

Considerando o sistema composto pelo conversor eletrônico/motor/veículo, como na Figura 3.6, em que a componente do veículo pode ser desprezada, uma vez que a variação de binário e corrente do motor é muito mais rápida que a variação de velocidade do veículo, aplica-se assim as expressões da coluna do controlador PID, sendo a variável K a velocidade de referência do veículo, L o atraso inicial e T o tempo que demora depois do atraso inicial até começar a convergir para a velocidade de referência.

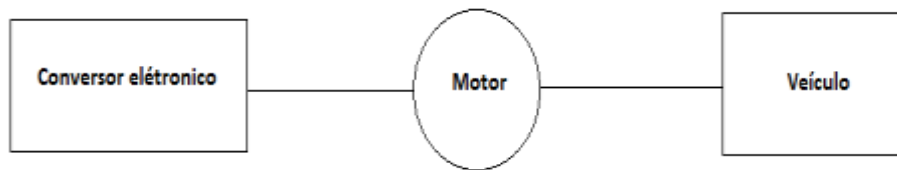


Figura 3.6 - Sistema conversor/motor/veículo.

Para além do método referido, usando o sintonizador do PID disponibilizado pela ferramenta Matlab, é possível obter diferentes respostas do sistema e, desta forma, os parâmetros do controlador. É pretendido um sistema sobre-armortecido (sem sobrelevação), de modo a que o veículo convirja para a velocidade pretendida, sem acelerações excessivas desnecessárias e com uma resposta relativamente rápida. Com este sintonizador é possível fazer os ajustes manualmente.

3.3. Implementação do modelo completo de simulação

Inicialmente usou-se o conjunto de regras de Ziegler-Nichols de modo a fazer uma pré-sintonização do controlo de velocidade do veículo elétrico. Uma vez que o controlo de velocidade do veículo não apresentava a resposta pretendida, usou-se depois o método “auto-tune” para se conseguir obter uma resposta sem sobrelevação e relativamente rápida, tendo-se obtidos os seguintes ganhos para o controlador: $k_p=14$, $k_i=5$ e $k_d=6$.

Na Figura 3.8 pode ver-se o diagrama esquemático do motor CC sem acionamento em conjunto com a dinâmica do veículo. Este motor foi implementado de acordo com o circuito do induzido do motor, que é dado pela equação (3.3). Neste caso, não existe qualquer tipo de limitação de corrente, o que provoca uma resposta mais rápida do sistema. Esta situação não é exequível, uma vez que este fator provoca uma corrente elevadíssima, que consequentemente, danificaria o motor. O veículo é alimentado através de um conversor CC/CC alimentado por uma bateria, tal como é ilustrado na Figura 3.7.

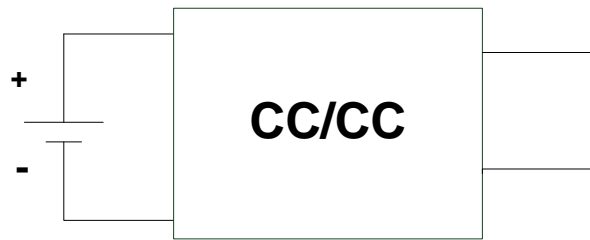


Figura 3.7 - Conversor CC/CC alimentado por uma bateria.

O bloco do motor (a verde) tem como entrada a tensão a ser-lhe aplicada e a velocidade do veículo (por retroação), que são ambas variáveis da equação do motor (equação (3.3)). A velocidade será ainda usada para calcular a força de resistência total (equação (2.1)) e de seguida o binário resistente (equação (2.8)). A entrada restante, o escorregamento longitudinal λ , serve para determinar o momento de inércia global do veículo (equação (2.11)), que será depois usado para calcular a velocidade angular do motor, representada pela equação (2.6).

Os blocos azuis representam a dinâmica do pneu e do veículo, tendo como entrada a velocidade angular do motor, criando as forças longitudinais e laterais que surgem entre o contato pneu-estrada (fórmula de *Pacejka*). São nestes blocos que a velocidade do veículo é criada, através das equações (2.24), (2.25) e (2.26), que depois será usada como entrada no bloco do motor, para controlar a velocidade do veículo (uma vez que a velocidade é diretamente proporcional à tensão).

Na Figura 3.9 e no Anexo A pode observar-se o interior do esquema de blocos do motor CC e da dinâmica do veículo, respetivamente, verificando assim os sub-blocos criados que descrevem as equações mencionadas.

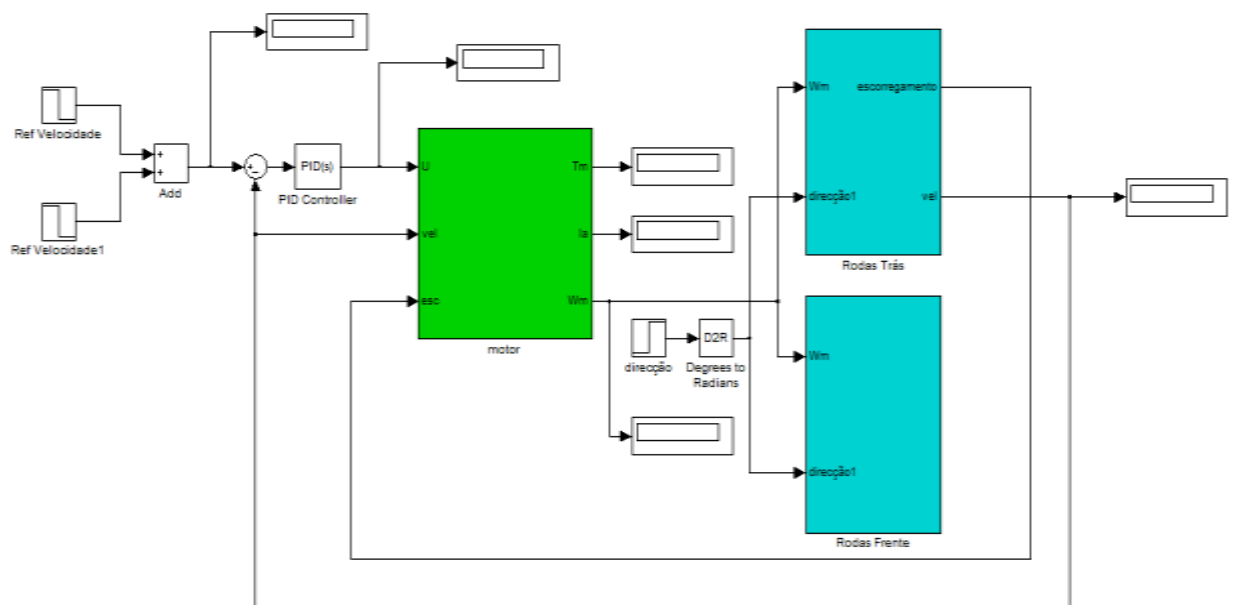


Figura 3.8 – Diagrama esquemático do motor CC sem acionamento com a dinâmica do veículo.

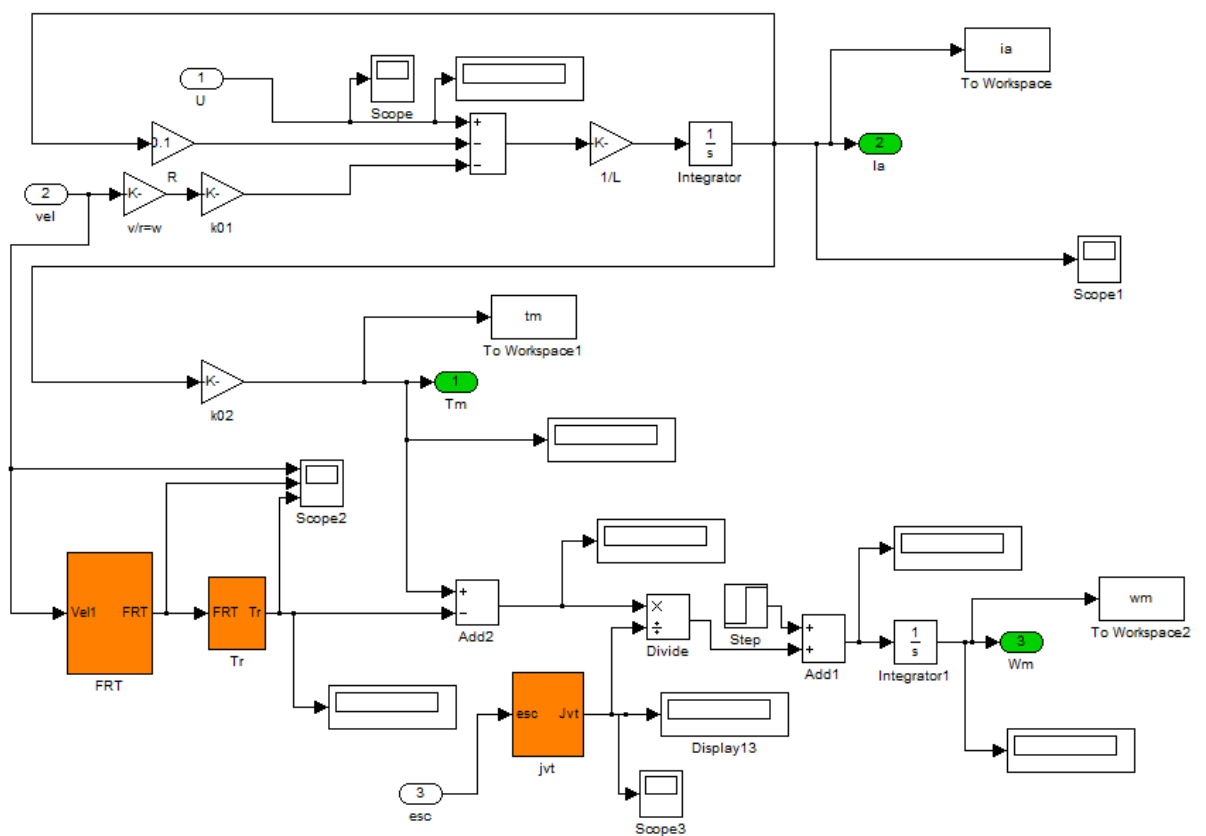


Figura 3.9 – Diagrama esquemático do bloco motor CC sem acionamento.

Para este motor, foi testada a dinâmica do veículo num percurso (de asfalto) com rampas e uma curva no fim enquanto desce (aos 12 segundos). Com esta simulação, pretende-se estudar a evolução do binário e da corrente do motor em cada um dos planos inclinados e da curva. Pretende-se também estudar alguns aspetos sobre a dinâmica do veículo, como o escorregamento e as forças longitudinal e lateral criadas. O percurso efetuado está ilustrado na Figura 3.10.

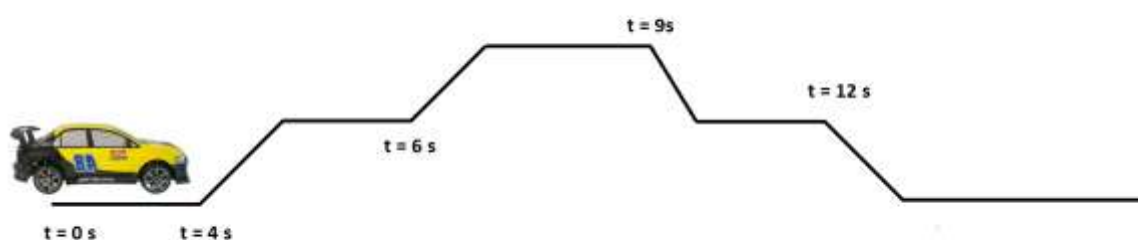


Figura 3.10 - Percurso simulado.

Na Figura 3.11 pode observar-se a evolução da corrente do motor durante o percurso da Figura 3.10. No instante inicial (0 segundos), ocorre o arranque do veículo, o que provoca a elevada corrente no princípio. Aos 4 e aos 6 segundos o veículo inicia a subida de uma rampa, exigindo assim um maior “esforço” por parte do motor, provocando um elevado valor da corrente. Aos 9 segundos o veículo começa uma descida, impondo desta forma uma corrente negativa, uma vez que tenta manter a velocidade de referência, e portanto, obriga o motor a travar o veículo. Aos 12 segundos começa-se a paragem do veículo enquanto este se move segundo o eixo y também. Esta imobilização causou um novo pico de corrente negativa.

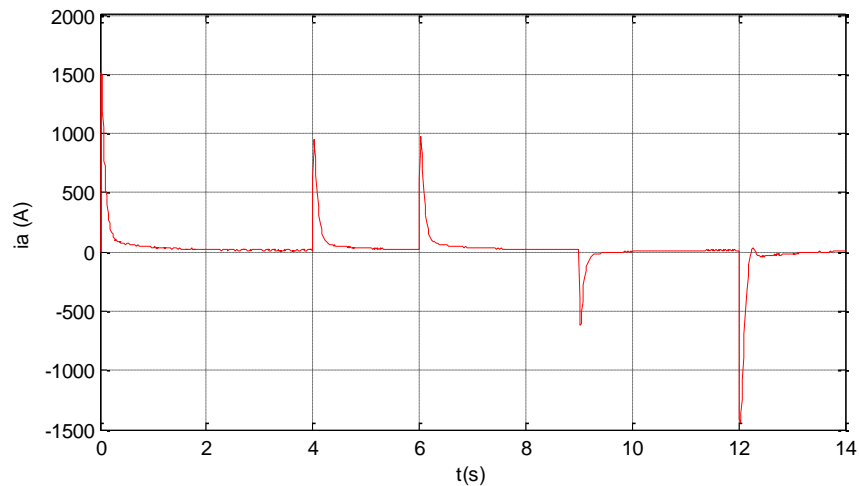


Figura 3.11 - Corrente no induzido do motor.

A Figura 3.12 apresenta de forma mais detalhada a Figura 3.11. Como se pode verificar, no arranque existe um elevado pico de corrente, diminuindo depois para um valor mais próximo de 0 depois de terminar a subida. Aos 4 segundos há um novo pico de corrente devido à segunda rampa. Pode ver-se que a corrente começa depois a diminuir, mas aos 6 segundos existe outro pico devido à terceira rampa. Depois de completar a rampa, a corrente começa a diminuir mais uma vez até que é comandada a imobilização do veículo. Desta vez o pico de corrente será negativo, de modo a que o veículo pare de se mover. Quando isso acontecer, a corrente atinge o valor 0, tal como se verifica na Figura 3.12.

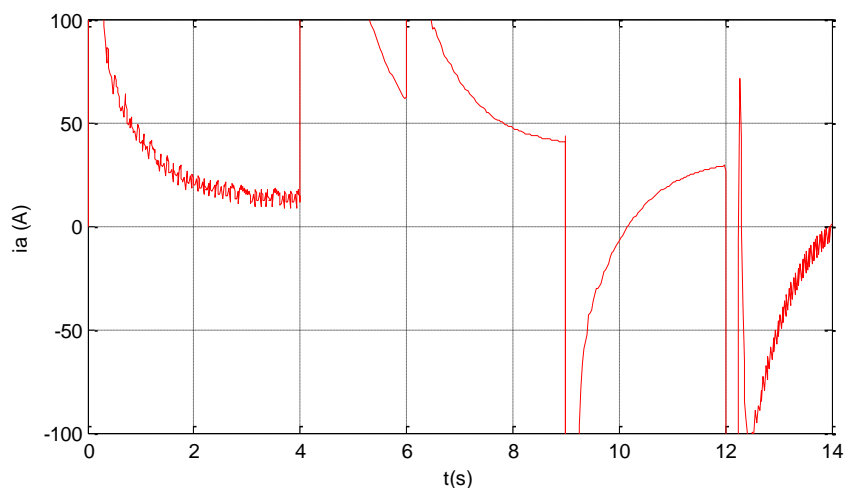


Figura 3.12 - Corrente no induzido do motor.

Sendo o binário diretamente proporcional à corrente, o comportamento do binário é igual ao da corrente, tal como se pode verificar na Figura 3.13.

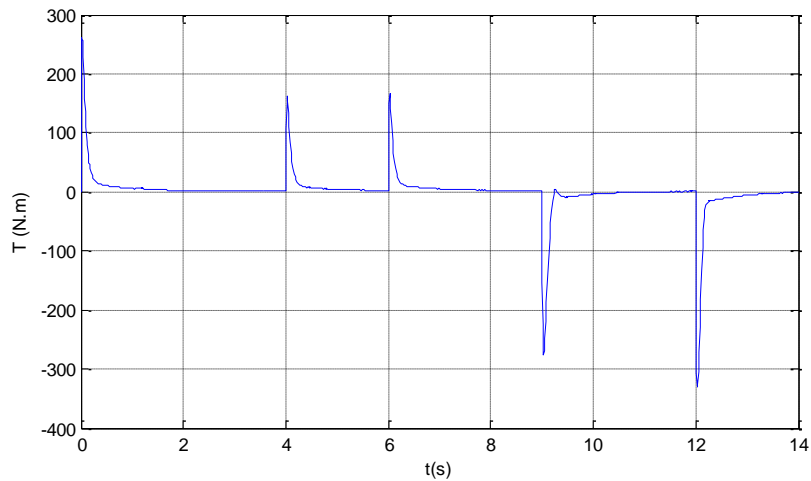


Figura 3.13 - Binário do motor.

Na Figura 3.14 estão ilustradas as forças longitudinal (a azul) e lateral (a vermelho) ao longo do percurso. Uma vez que o percurso foi retilíneo até aos 12 segundos, a força lateral é 0 até esse instante. No início, existe uma força longitudinal maior para iniciar o movimento do veículo. Aos 4 e aos 6 segundos volta a haver um aumento da força, uma vez que o veículo entra numa rampa. Aos 9 segundos existe um pico negativo, por causa da descida. No fim é possível verificar que a força longitudinal assume um valor negativo, de modo a imobilizar o veículo.

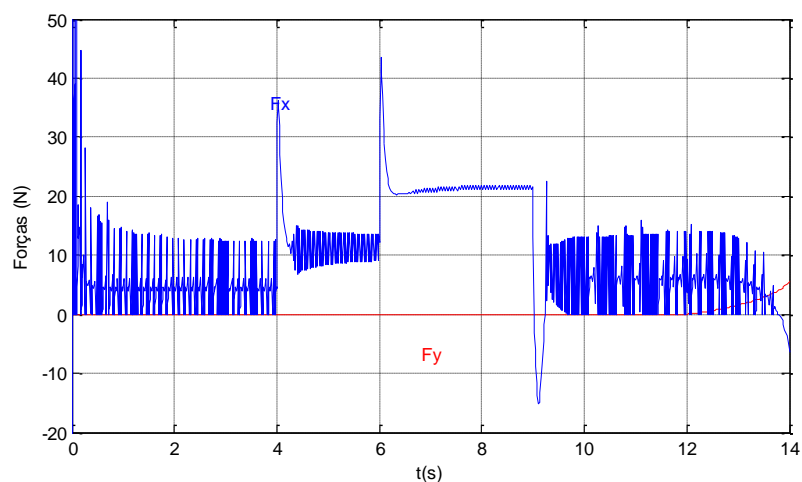


Figura 3.14 - Forças longitudinal e lateral.

A Figura 3.15 ilustra a distância percorrida segundo o eixo x e a Figura 3.16 a distância percorrida segundo o eixo y, respectivamente. Como se pode verificar, só a partir dos 12 segundos é que há movimento segundo o eixo y, que foi quando se iniciou a curva.

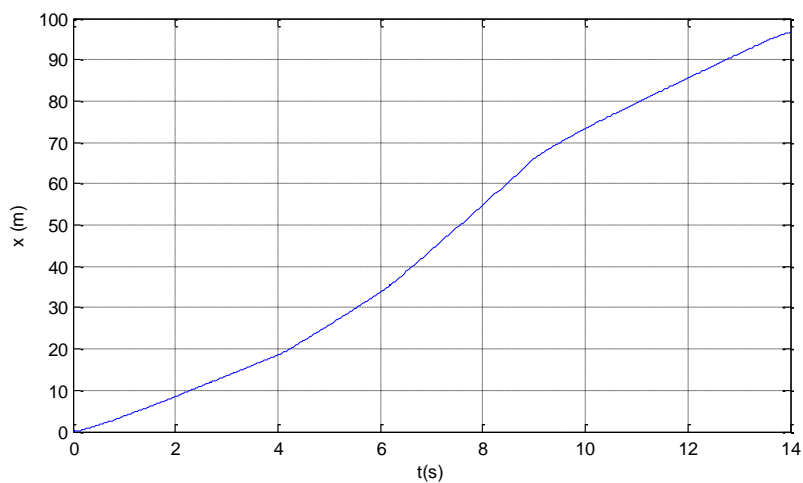


Figura 3.15 - Distância percorrida segundo eixo x.

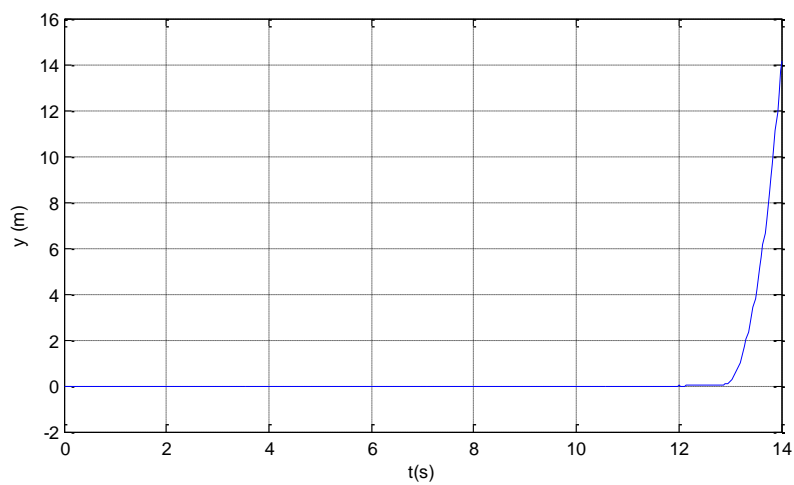


Figura 3.16 - Distância percorrida segundo o eixo y.

Depois de ser verificado o efeito das rampas e curvas na dinâmica do veículo, simulou-se um novo percurso, que foi a mesma situação simulada para os outros motores estudados. Inicialmente, é imposta uma velocidade de 7 m/s. Aos 4 segundos impõe-se uma nova velocidade de 5 m/s e aos 6 segundos, pretende-se iniciar a imobilização do veículo. A Figura 3.17 ilustra a situação descrita.

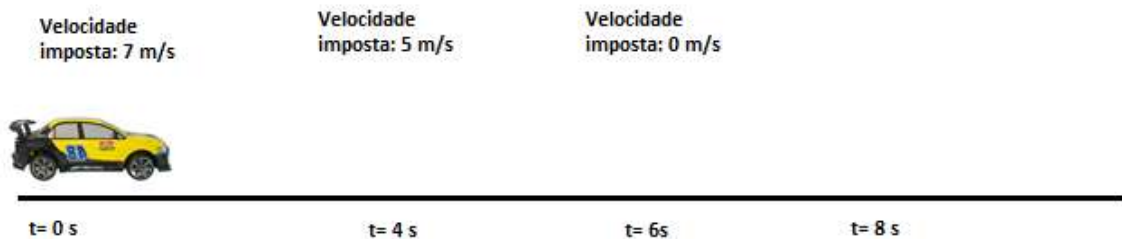


Figura 3.17 - Percurso retilíneo com variações de velocidade.

A Figura 3.18 ilustra a evolução da velocidade do veículo e das suas rodas durante o percurso da Figura 3.17, sendo a curva azul a velocidade do veículo e a curva vermelha a velocidade das rodas.

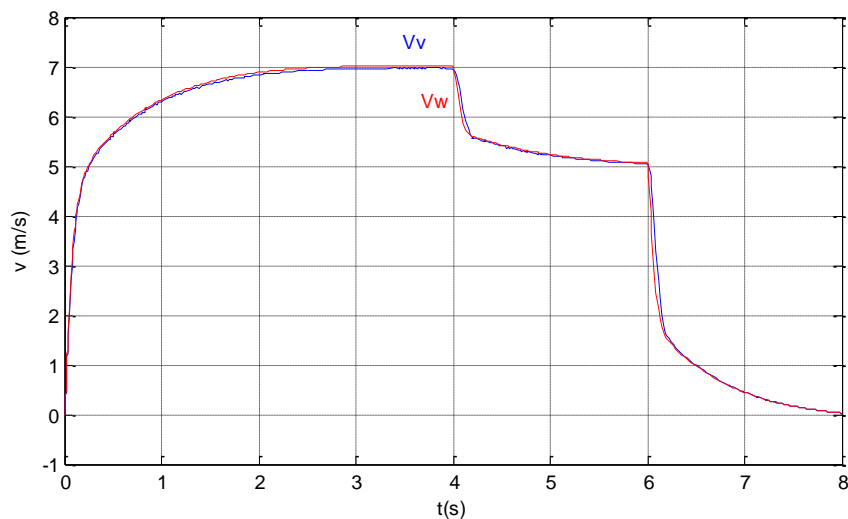


Figura 3.18 - Velocidade das rodas e do veículo.

No início, impõe-se uma velocidade de referência de 7 m/s. Devido à não limitação de corrente, pode-se verificar que o veículo atingiu os 5 m/s quase instantaneamente. O sistema é sobre-armortecido, tal como era pretendido. A velocidade vai aumentando até convergir para a velocidade pretendida. Aos 4 segundos é imposta uma nova velocidade ao veículo, que foram 5 m/s. Passado

aproximadamente 2 segundos, o veículo atinge essa velocidade. Para finalizar, aos 6 segundos, pretende-se imobilizar o veículo, impondo-se assim uma velocidade de referência de 0 m/s. Como se pode verificar, o veículo imobilizou-se em 1 segundo (isto acontece por causa das correntes elevadas do motor CC sem acionamento, que não tem limitação de corrente).

Na Figura 3.19 encontra-se o escorregamento do veículo para a situação representada na Figura 3.17. Como se pode verificar, no arranque existe um maior escorregamento, ultrapassando os 0.1. Isto acontece devido ao veículo estar parado e as rodas começarem a mover-se. Depois de já estar em movimento, o valor do escorregamento diminui quase para zero, uma vez que a velocidade do veículo e das rodas são quase iguais. Aos 4 segundos, é imposta uma velocidade inferior à atual, o que leva por um momento as rodas a possuírem uma velocidade superior à do veículo (o que provoca o escorregamento negativo). Aos 6 segundos pretende-se imobilizar o veículo, provocando novamente um escorregamento negativo. Desta vez o valor em módulo é maior, porque é necessária uma maior travagem para parar o veículo (havendo assim uma maior diferença de velocidade entre eles). É possível observar oscilações no escorregamento na travagem final. Isto sucede porque o controlador impõe ao veículo uma velocidade de zero, mas isto não sucede linearmente (como num sistema ABS, em que não há o bloqueio das rodas). O veículo está gradualmente a avançar para a velocidade zero, fazendo sucessivas paragens até finalmente imobilizar o veículo, o que provoca a oscilação final do escorregamento, tal como se pode observar.

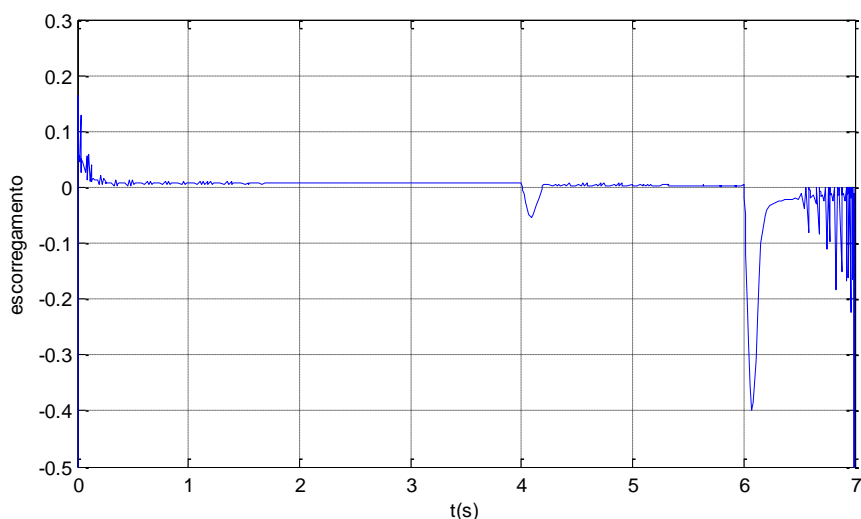


Figura 3.19 – Escorregamento.

A Figura 3.20 ilustra a evolução da corrente para a mesma situação. No arranque é exigida uma corrente elevada ao motor, de modo a que o veículo vença as forças resistentes ao movimento e se

comece a mover. Como se pode verificar, o valor da corrente no início é de 2000 A, o que faria com que um motor real queimasse. Aos 4 segundos obtém-se uma corrente negativa, provocada pela referência de velocidade inferior à atual. Aos 6 segundos obtém-se novamente uma corrente negativa que atinge quase os -2000 A, devido à imobilização do veículo.

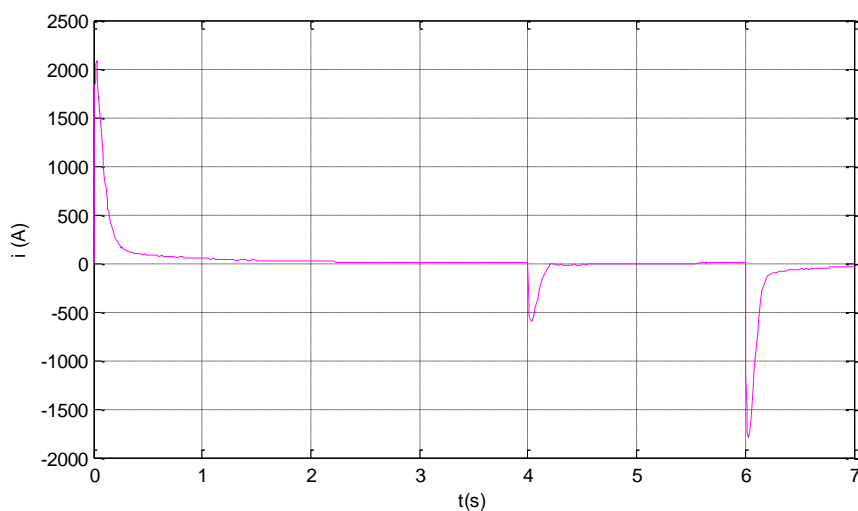


Figura 3.20 - Corrente do motor.

O valor do binário é diretamente proporcional à corrente, tal como se pode verificar na equação (3.2). Assim sendo, a evolução do binário é igual à da corrente, tal como mostra na Figura 3.21.

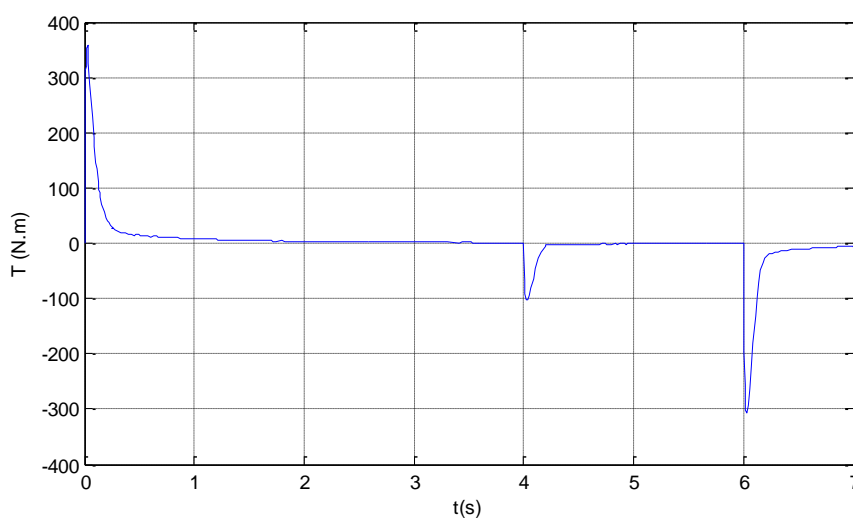


Figura 3.21 - Binário do motor.

A Figura 3.22 ilustra a força longitudinal no contacto pneu-estrada. No arranque, existe uma grande força longitudinal que irá provocar o arranque do veículo. Aos 4 segundos surge uma força negativa como resultado de uma velocidade inferior imposta. Aos 6 segundos volta a aparecer uma força longitudinal negativa, mas desta vez com um valor em módulo superior, uma vez que se está a imobilizar o veículo.

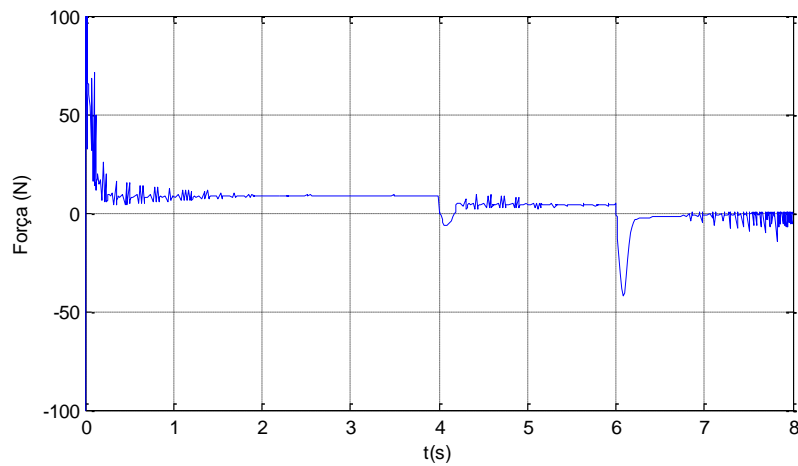


Figura 3.22 - Forças longitudinal e lateral no contacto pneu-estrada.

A Figura 3.23 mostra a distância percorrida pelo veículo, que foi obtida através do integral da velocidade.

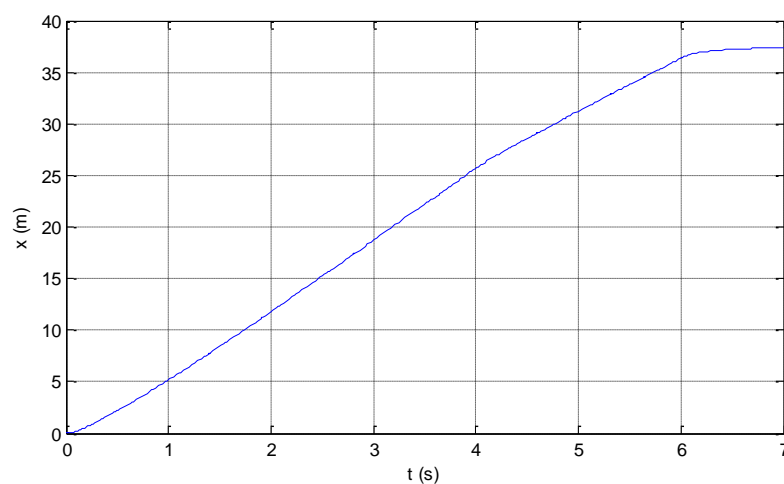


Figura 3.23 - Distância percorrida segundo o eixo x.

Aplicando agora um bloco saturador na corrente, limitou-se o seu valor em 100 A. Esta alteração fará com que o veículo demore mais tempo a atingir as velocidades pretendidas. Tal como se pode observar na Figura 3.24, a progressão da velocidade é muito menos repentina do que sem limitação de corrente, demorando assim mais tempo a atingir a velocidade imposta. No início tem-se uma velocidade de referência de 7 m/s. Aos 4 segundos, a velocidade de referência passa a ser de 5 segundos, havendo assim uma diminuição gradual da velocidade, demorando cerca de 3 segundos (mais tempo do que no caso sem limitação de corrente) até atingir essa velocidade. Aos 8 segundos pretende-se imobilizar o veículo, atingindo este a velocidade 0 aos 10 segundos.

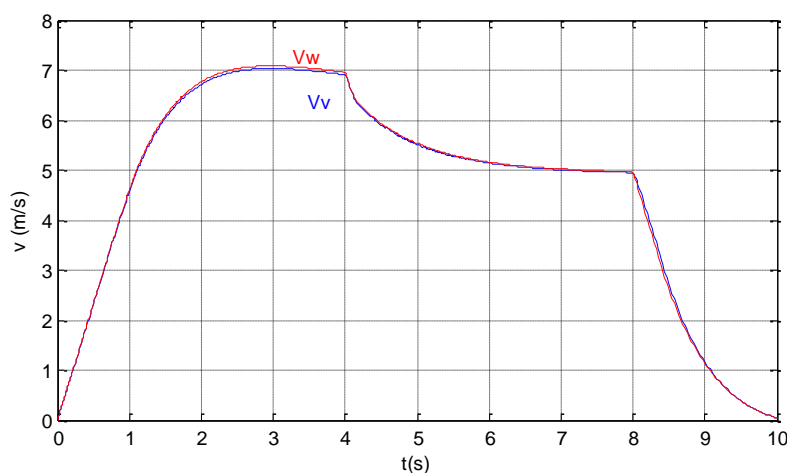


Figura 3.24 - Velocidade das rodas e do veículo.

Na Figura 3.25 pode observar-se a corrente do motor, que tal como foi indicado, está limitada em 100 A.

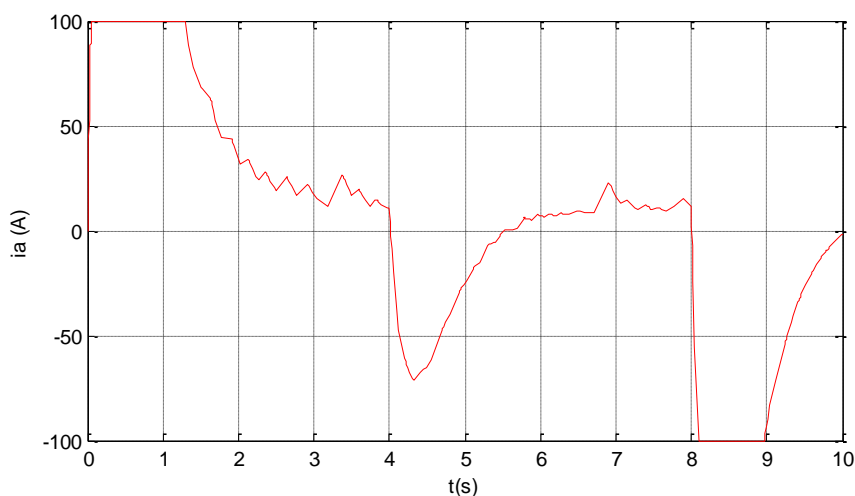


Figura 3.25 - Corrente no motor limitada a 100 A.

4. Motorizações e técnicas de controlo

Neste capítulo apresenta-se novamente o modelo completo de simulação do conjunto motor e veículo, mas desta vez com motor de corrente contínua com acionamento, com o motor assíncrono e com o motor síncrono de magnetos permanentes. Para isso, será necessário fazer um estudo dos motores em falta e das suas respetivas técnicas de controlo.

Em seguimento do capítulo anterior, tendo já sido feito o estudo do motor de corrente contínua, será apresentado o modelo do motor com o veículo, mas desta com acionamento no motor e com uma corrente limitada a 30 A.

4.1. Motor CC com controlo

Na Figura 4.1 encontra-se o diagrama esquemático do motor CC com acionamento em conjunto com a dinâmica do veículo implementado. Na Figura 4.2 é possível ver o interior do bloco do motor CC. Para este caso foi usado um conversor 4 quadrantes, de modo a obter correntes negativas de modo a efetuar a travagem do veículo. Os blocos de referência de velocidade à entrada do motor são responsáveis por controlar as variações de velocidade do veículo ao longo do percurso retilíneo.

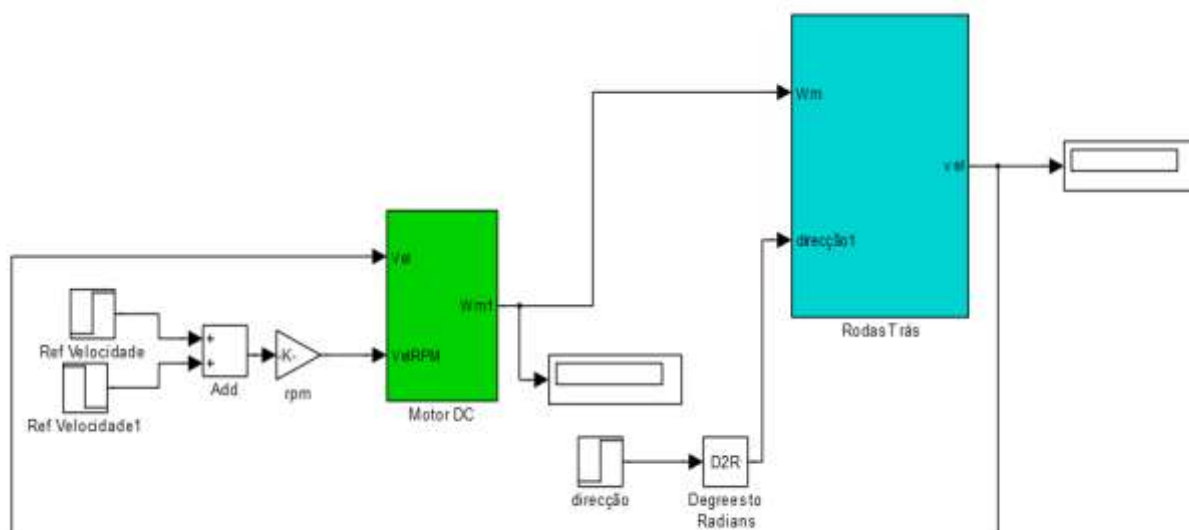


Figura 4.1 – Diagrama esquemático do motor CC com acionamento com a dinâmica do veículo.

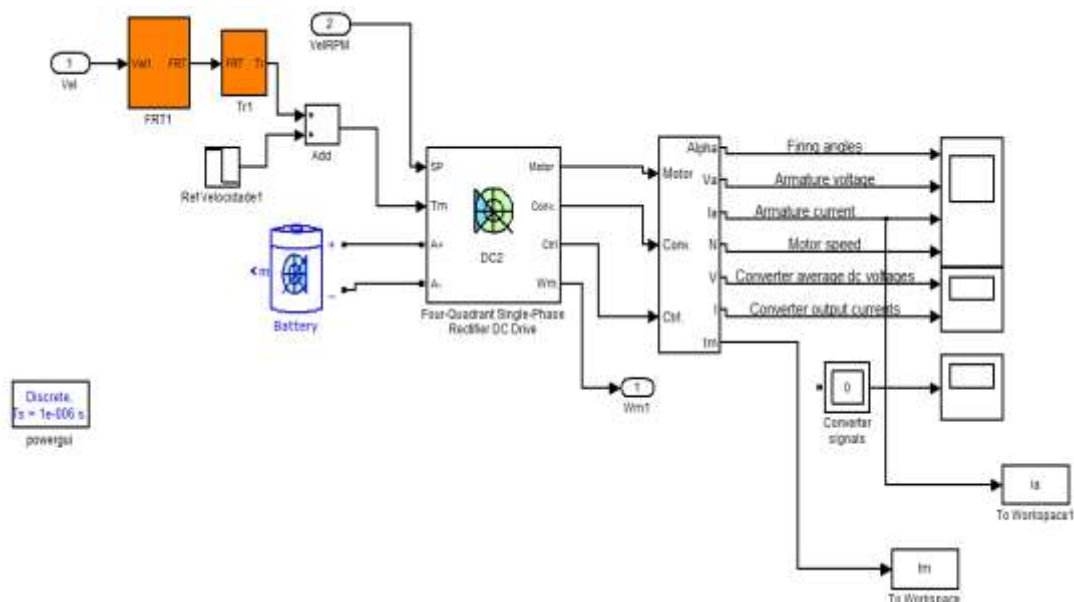


Figura 4.2 – Diagrama esquemático do interior do bloco motor CC com conversor de 4 quadrantes.

Na Tabela 4.1 podem observar-se as características do motor CC usado na simulação.

Tabela 4.1 - Características do motor CC

Motor CC	
Potência Nominal (cv)	5
Resistência do induzido (Ω)	0.78
Indutância do induzido (H)	0.016
Resistência de campo (Ω)	150
Indutância de campo (H)	112.5
Indutância mútua do campo-induzido (H)	1.234
Inércia total ($kg.m^2$)	0.05
Coefficiente viscoso ($N.m.s$)	0.01

A Figura 4.3 ilustra o interior do bloco do conversor de quatro quadrantes com o motor CC. O bloco DC2 encontra-se no SimPowerSystems (Electric Drive Models) da biblioteca do simulink.

A tensão do induzido é fornecida por dois conversores monofásicos com ligação anti-paralela regulados por dois controladores PI. Isto permite a circulação de fluxo bidirecional através do circuito do induzido do motor CC, e que assim que opere nos quatro quadrantes. Os conversores são alimentados por uma bateria com uma tensão nominal de 200 V e uma capacidade de 6.5 A.h.

Os reguladores (controladores) controlam os ângulos de disparo de ambos os tiristores. O primeiro é um regulador de velocidade, seguindo-se um regulador de corrente (que efetuam a limitação de corrente no valor da corrente de referência através de um bloco saturador). A saída do regulador de velocidade tem como referência a corrente do induzido usada pelo controlador de corrente, a fim de obter o binário eletromagnético necessário para atingir a velocidade desejada. O regulador de corrente controla a corrente do induzido, calculando os ângulos de disparo apropriados do tiristor. Isto gera as tensões de saída do conversor necessárias para obter a corrente do induzido desejada.

Ambos os conversores operam em simultâneo e os dois ângulos de disparo são controladas de modo que a sua soma dê 180 graus. Isto produz tensões médias opostas nos terminais de saída do conversor de corrente contínua e, assim, tensões médias iguais no induzido do motor CC. Um conversor está a funcionar no modo de retificador, enquanto o outro está no modo de inversor.

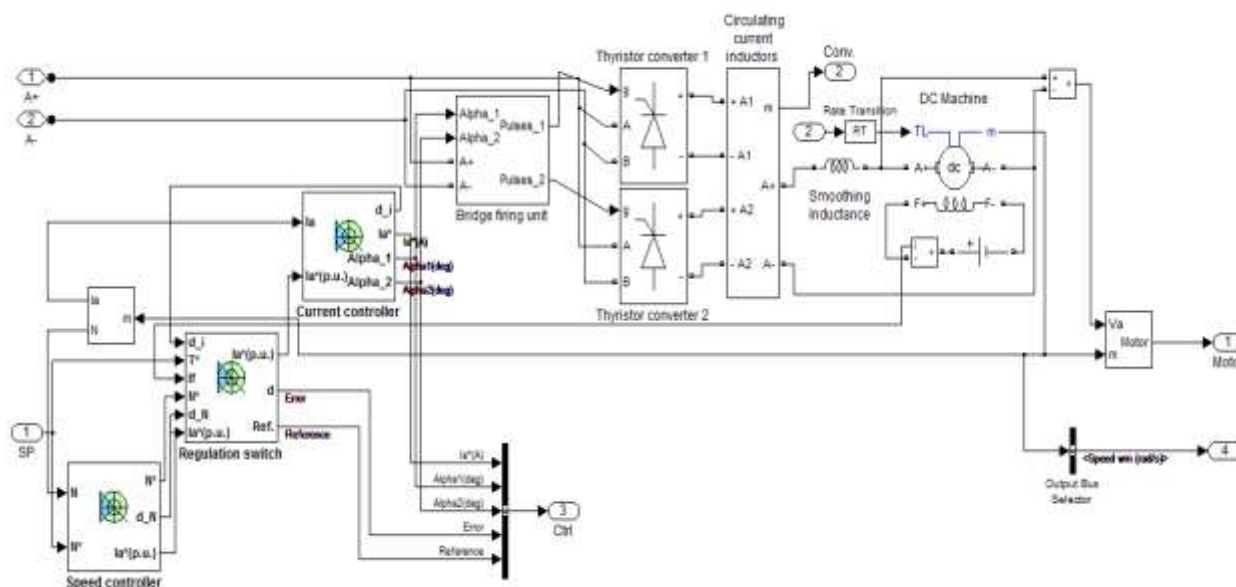


Figura 4.3 - Bloco do conversor de 4 quadrantes com motor CC.

A Figura 4.4 ilustra a mesma situação que na Figura 3.17, mas desta vez com um motor CC com acionamento (sendo a curva vermelha a velocidade das rodas e a azul a velocidade do veículo).

Neste caso, devido à limitação de corrente, o veículo não terá uma resposta tão rápida à velocidade pretendida, tal como acontecia no motor CC sem acionamento.

Desta vez, o veículo só chega aos 5 m/s quase após 1 segundo, enquanto que no motor CC sem acionamento, foi quase instantâneo e só após os 2 segundos é que atinge a velocidade pretendida, que são os 7 m/s. Mais uma vez tem-se um sistema sobre-amortecido, não havendo picos de velocidade desnecessários no veículo. Aos 4 segundos impõe-se a velocidade de 5 m/s e como se pode verificar, a redução de velocidade neste caso é menor (mais gradual), enquanto que no caso anterior, baixa muito rapidamente após os 4 segundos. Aos 6 segundos coloca-se uma velocidade de referência igual a zero e o veículo demora cerca de 2 segundos a imobilizar-se, mas também de uma forma muito mais gradual (menos rápida), enquanto que o motor CC sem acionamento faz uma redução de velocidade brusca.

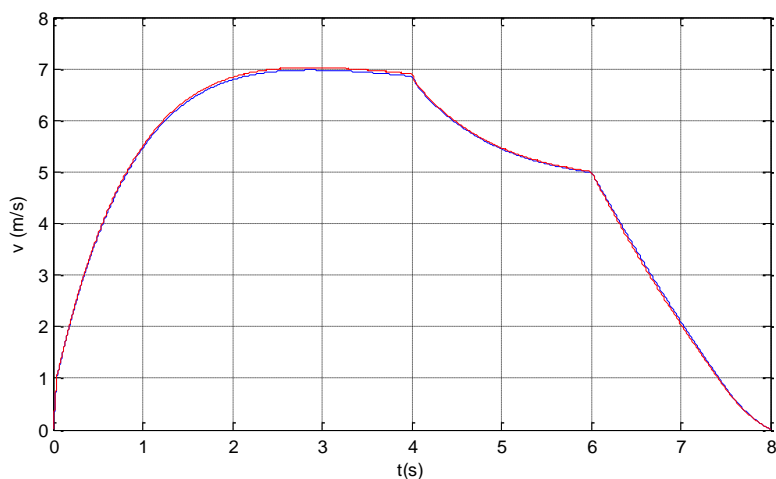


Figura 4.4 - Velocidade das rodas e do veículo.

Na Figura 4.5 encontra-se o escorregamento do veículo para a situação representada na Figura 4.4. Como se pode verificar novamente, no arranque existe um maior escorregamento. Isto acontece devido ao veículo estar parado e as rodas começarem a mover-se. Depois de já estar em movimento, o valor do escorregamento diminui quase para zero, uma vez que a velocidade do veículo e das rodas são quase iguais. Aos 4 segundos, é imposta uma velocidade inferior à atual, que provoca uma pequena variação no escorregamento, uma vez que a redução de velocidade foi bastante gradual. Aos 6 segundos pretende-se imobilizar o veículo, provocando assim um escorregamento negativo. Isto acontece pelo facto de na travagem, o veículo ter uma velocidade superior à das rodas. No fim, quando o veículo já se encontra imobilizado, o escorregamento passa a ser zero.

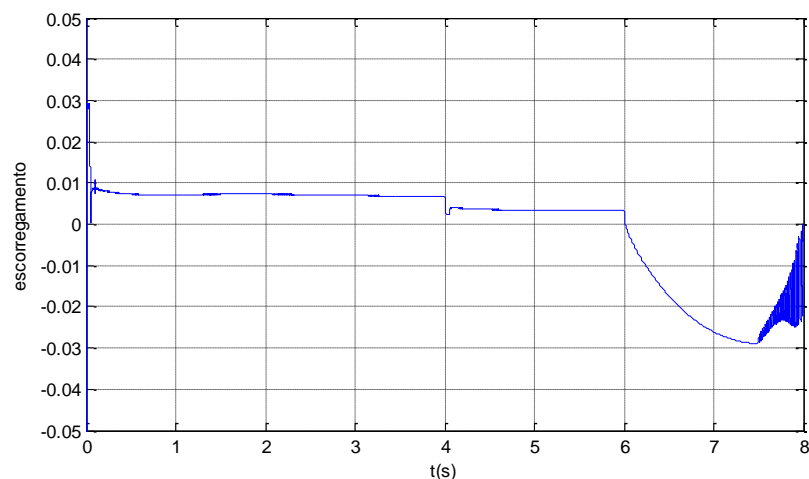


Figura 4.5 – Escorregamento.

Na Figura 4.6 é possível ver a evolução da corrente (a azul, sendo a linha verde o seu valor médio) ao longo do trajeto. Como se pode observar, o valor da corrente é maior no início, uma vez que o veículo estava parado, sendo necessária uma maior corrente para vencer as forças resistentes ao movimento. Aos 4 segundos reduz-se a velocidade, diminuindo assim a amplitude da corrente. Aos 6 segundos inicia-se a imobilização do veículo, o que leva a corrente a atingir um valor negativo (devido à travagem) e por fim, o valor zero (quando parar).

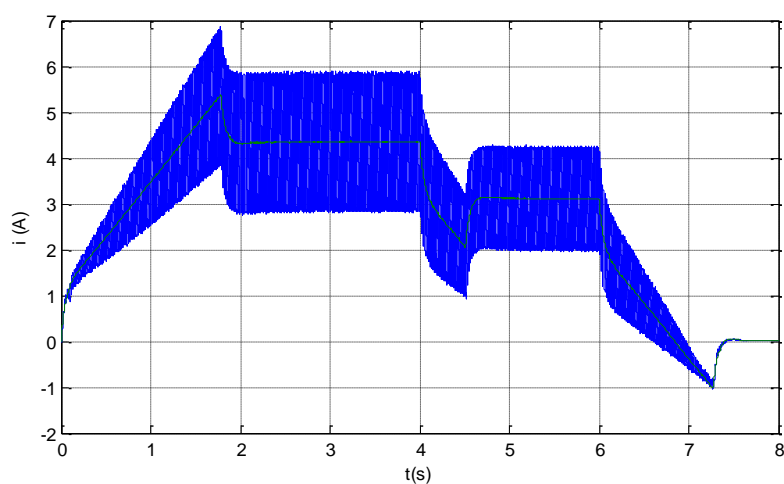


Figura 4.6 - Corrente no induzido do motor.

Na Figura 4.7 pode-se observar o binário do motor. Sendo este diretamente proporcional à corrente, o seu comportamento é igual ao da corrente na Figura 4.6.

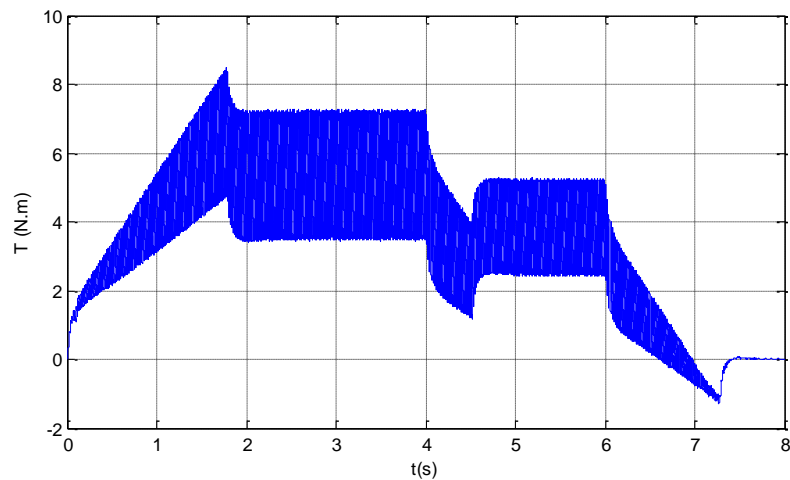


Figura 4.7 - Binário do motor.

Na Figura 4.8 pode observar-se que no arranque do veículo é necessária uma força maior no veículo. Quando a velocidade é reduzida aos 4 segundos, também é reduzida a força entre o contacto pneu-estrada. Por fim, aos 6 segundos obtém-se uma força negativa devido à travagem do veículo, de modo a contrariar o movimento.

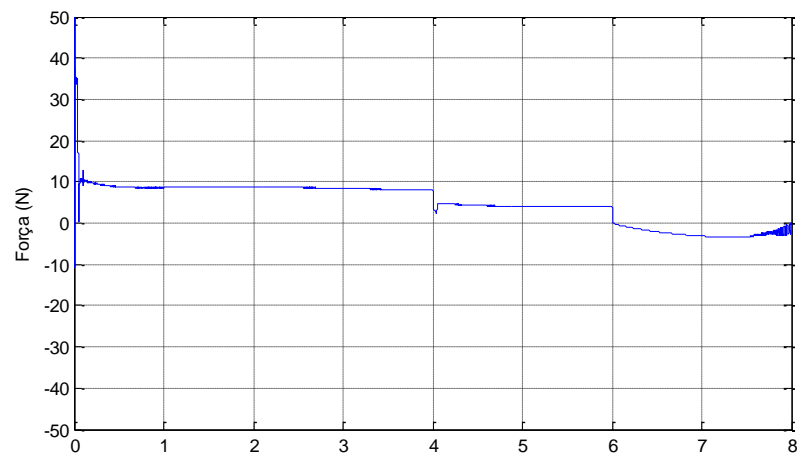


Figura 4.8 - Forças longitudinal no contacto pneu-estrada.

A Figura 4.9 mostra a distância percorrida pelo veículo, que foi obtida através do integral da velocidade.

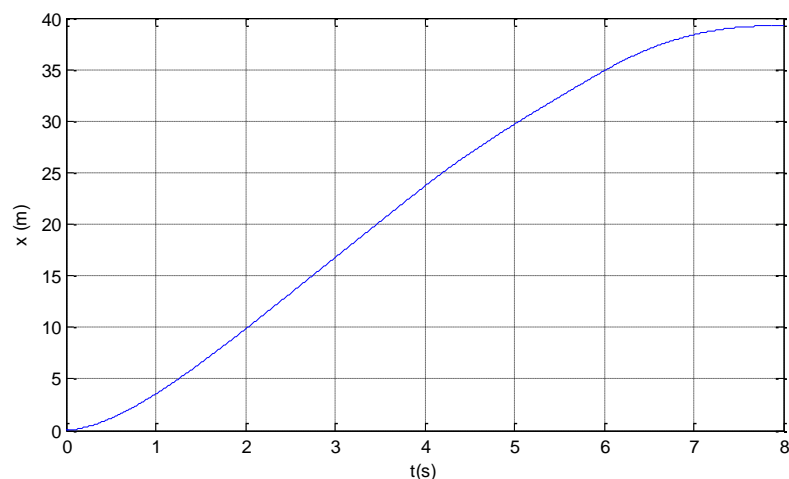


Figura 4.9 - Distância percorrida segundo o eixo x.

4.2. Descrição e Princípio de Funcionamento do Motor Assíncrono

O motor assíncrono é composto por um estator e um rotor, sendo o espaço entre eles denominado de entreferro.

O rotor de um motor assíncrono pode ser de dois tipos: rotor em gaiola de esquilo ou rotor bobinado. O rotor em gaiola de esquilo é composto por um conjunto de barras de material condutor encaixadas em ranhuras no rotor e curto-circuitadas por anéis metálicos nas extremidades (sendo este o mais utilizado, devido à sua simplicidade e robustez de construção) [6] [25].

Os motores assíncronos são motores de construção simples, fiáveis, de pouca manutenção, de baixo custo e têm uma boa capacidade para funcionar em ambientes pouco seguros. Devido à sua curva de binário característica, e devido à técnica de controlo normalmente usada, o controlo por orientação de campo permite alcançar velocidades entre 3 a 5 vezes superiores à sua velocidade nominal. A variação de velocidade nestes motores é efetuada através da variação da frequência e da tensão.

Ao aplicar uma tensão alternada nos enrolamentos do estator, é criado um campo magnético girante com velocidade proporcional à frequência da rede. O fluxo magnético girante ao atravessar o entreferro, induz uma tensão alternada nos enrolamentos do rotor. Estando os enrolamentos do rotor curto-circuitados, a tensão induzida irá fazer com que o enrolamento do rotor seja percorrido por uma

corrente, criando desta forma um fluxo magnético que se irá tentar alinhar com o campo magnético girante do estator.

O sistema trifásico de correntes nos enrolamentos do estator é representado pelas equações (4.1) a (4.3) [15]:

$$I_a = I \cos(\omega_e t) \quad (4.1)$$

$$I_b = I \cos\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (4.2)$$

$$I_c = I \cos\left(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (4.3)$$

em que ω_e corresponde à velocidade angular do campo girante.

A diferença de velocidade $N_e - N_r$, induz corrente no estator, produzindo assim binário. O rotor move-se na mesma direção do campo magnético girante para reduzir a corrente induzida. A equação (4.4) representa o escorregamento do motor [16]:

$$s = \frac{N_e - N_r}{N_e} = \frac{\omega_e - \omega_{rotor}}{\omega_e} = \frac{\omega_{sl}}{\omega_e} \quad (4.4)$$

sendo:

N_e – Velocidade do campo girante do estator ou velocidade de sincronismo [rpm]

N_r – Velocidade do rotor [rpm]

ω_e – Velocidade do campo girante [rad/s]

ω_{rotor} – Velocidade elétrica de rotação do rotor [rad/s]

A velocidade de rotação mecânica é dada pela equação (4.12):

$$\omega_m = \frac{\omega_{rotor}}{p} \quad (4.5)$$

sendo p o número de pares de pólos.

4.2.1. Técnica de controlo do motor assíncrono

Pretende-se implementar o controlo do motor assíncrono para aplicação em veículos elétricos. Optou-se pelo método de controlo por orientação de campo (controlo vetorial), sendo uma técnica de controlo bastante comum neste tipo de motor.

Controlo por Orientação de Campo

Utilizando o método de controlo por orientação de campo (*Field Oriented Control*), a máquina assíncrona passa a ser controlada de maneira semelhante a um motor CC com excitação independente, permitindo o controlo independente do fluxo e do binário.

No controlo por orientação de campo controlam-se as seguintes variáveis:

- corrente nos enrolamentos do estator i_s ;
- amplitude (ψ_r) e fase (θ_e) do fluxo ligado no rotor.

A componente direta da corrente no estator i_{ds}^* é calculada através da equação (4.6) [27]:

$$i_{ds}^* = \frac{\psi_r^*}{L_m} \quad (4.6)$$

sendo L_m a indutância mútua.

A equação (4.7) representa o binário eletromagnético do motor assíncrono [27]:

$$T_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \psi_r i_{qs} \quad (4.7)$$

em que L_r é a indutância do rotor e i_{qs}^* é componente em quadratura da corrente no estator, que é dada pela equação (4.8):

$$i_{qs}^* = \frac{2}{3} \frac{1}{p} \frac{L_r}{L_m} \frac{T_e^*}{\psi_{dr}^*} \quad (4.8)$$

O princípio de funcionamento do controlo por orientação de campo consiste no conhecimento exato da localização do referencial dq . Para isso, é necessário determinar a posição θ_e , que é expressa pela equação (4.9):

$$\theta_e(t) = \int_0^t \omega_e dt = \int_0^t (\omega_r + \omega_{sl}) dt = \int_0^t (\omega_r + \frac{R_r L_m i_{qs}}{L_r \psi_{dr}}) dt \quad (4.10)$$

sendo ω_e a velocidade de sincronismo, ω_r a velocidade elétrica de rotação do rotor e ω_{sl} a velocidade do campo girante do estator em relação ao rotor.

As correntes a serem aplicadas nas fases dos enrolamentos do estator são dadas pelas equações (4.11) a (4.13), sendo estas obtidas através da transformação do referencial dq para abc .

$$i_a^* = \sqrt{\frac{2}{3}} [i_{ds}^* \cos(\theta_e) - i_{qs}^* \sin(\theta_e)] \quad (4.11)$$

$$i_b^* = \sqrt{\frac{2}{3}} [i_{ds}^* \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) - i_{qs}^* \sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3})] \quad (4.12)$$

$$i_c^* = \sqrt{\frac{2}{3}} [i_{ds}^* \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) - i_{qs}^* \sin(\theta_e + \frac{2\pi}{3})] \quad (4.13)$$

O método de controlo por orientação de campo pode ser classificado como direto ou indireto, dependendo do método de obtenção da referida posição do fluxo ligado no rotor. Para este caso, foi usado o método indireto, que recorre a observadores de fluxo, obtendo assim a grandeza pretendida

através da medição da velocidade do rotor e das tensões e correntes no estator. Usando um controlador PI em malha fechada de velocidade, é possível obter um sinal de referência relativo ao binário eletromagnético, proporcional à evolução da referência de velocidade. Mais uma vez, o controlador foi dimensionado graças ao seu sintonizador, que permite obter os parâmetros consoante a resposta desejada [27].

4.2.2. Implementação do modelo completo de simulação

Na Figura 4.10 pode ver-se o diagrama esquemático do motor assíncrono (com gaiola de esquilo) e do controlador por orientação de campo usado.

Este modelo encontra-se disponível na biblioteca SimPowerSystems (Power Electronics Models) do simulink, tendo sido adaptado para usar em conjunto com a dinâmica do veículo. O controlador de velocidade (que é um PI) gera uma referência de binário de acordo com o erro existente entre a velocidade de referência e a velocidade medida. Este motor é alimentado em CC através de uma bateria. Ao contrário das restantes simulações, esta é realizada em tempo discreto com um tempo de amostragem de $2 \cdot 10^{-6}$ segundos.

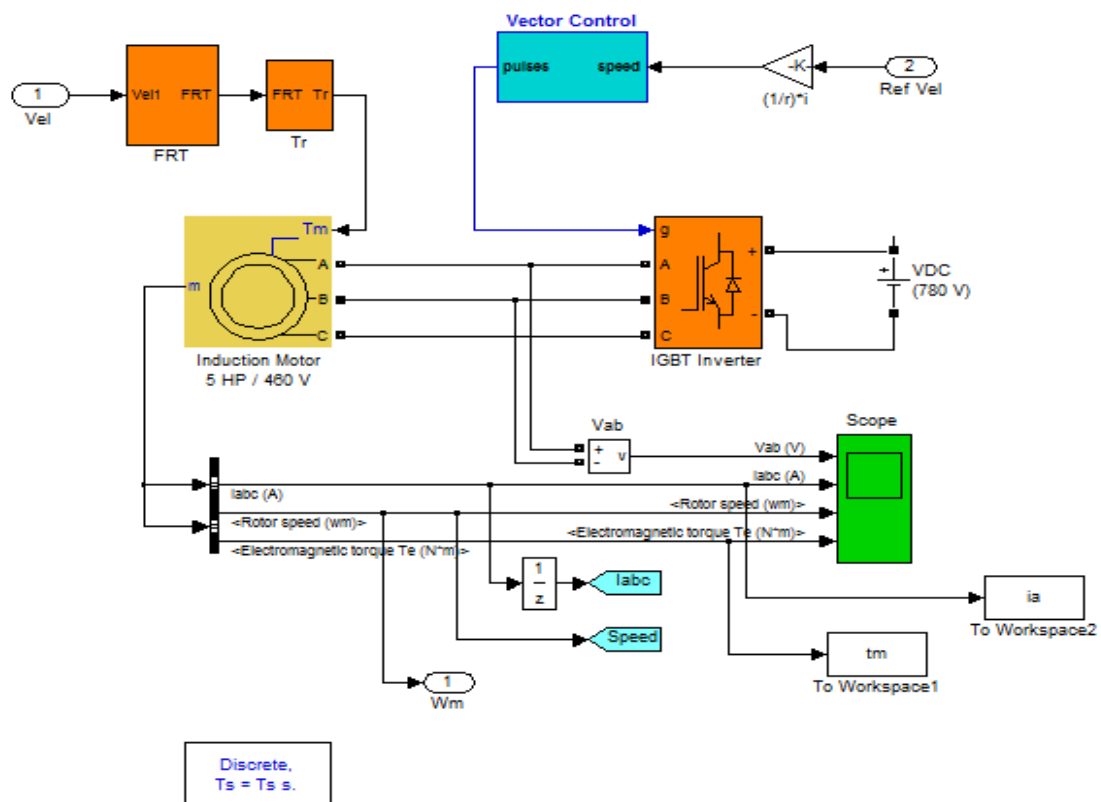


Figura 4.10 – Diagrama esquemático do motor assíncrono com controlo por orientação de campo.

Na Tabela 4.2 podem observar-se as características do Motor Assíncrono usado na simulação.

Tabela 4.2 - Características do Motor Assíncrono.

Motor Assíncrono	
Potência Nominal (cv)	5
Tensão (V)	460
Frequência (H_z)	60
Resistência do estator (Ω)	0.087
Indutância do estator (H)	0.8×10^{-3}
Resistência do rotor (Ω)	0.228
Indutância de campo (H)	0.8×10^{-3}
Indutância mútua (H)	34.7×10^{-3}
Inércia ($kg.m^2$)	1.662
Fator de atrito ($N.m.s$)	0.1
Par de pólos	2

A Figura 4.11 ilustra o diagrama de blocos do controlo por orientação de campo. As entradas do bloco Speed Controller correspondem à velocidade de referência do veículo e à velocidade do motor. O bloco Speed controller é o controlador PI que foi mencionado anteriormente, responsável por gerar uma referência de binário (que também limita o seu valor, salvaguardando assim o motor). O bloco Theta Calculation determina a posição do rotor, que pode ser representado pela equação (4.10). O bloco flux calculation determina o fluxo magnético do motor (equação (4.6)), que será usado para calcular a corrente i_q^* . Os blocos i_d^* Calculation e i_{qs}^* calculation calculam as respectivas correntes e são representados pelas equações (4.6) e (4.8). Por fim, os blocos ABC to dq conversion e dq to ABC conversion, dizem respeito às transformadas de Park e Clarke.

O bloco Current Regulator gera o sinal de pulsos a ser aplicado no transístor IGBT da Figura 4.10, que irá depois criar as três correntes a serem aplicadas no motor.

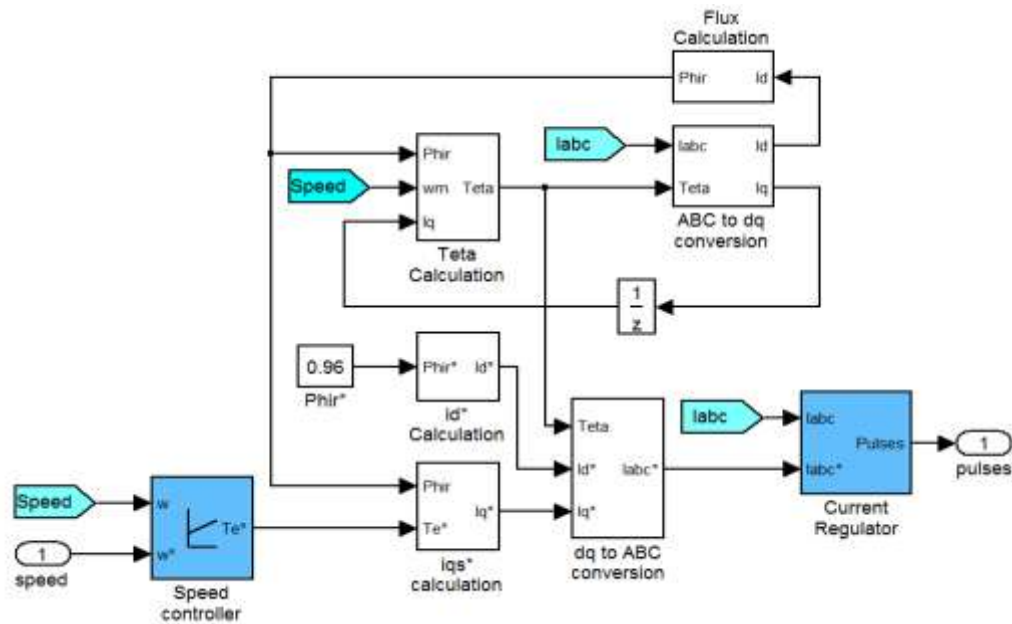


Figura 4.11 - Controlo por orientação de campo (controlo vetorial).

A situação simulada para este motor foi a mesma usada no capítulo 3 para o motor CC. A Figura 4.12 ilustra a velocidade do veículo e das rodas durante um pequeno trajeto. Para este caso, tal como se pode observar, obteve-se um pouco de sobrelevação na velocidade do veículo, ultrapassando inicialmente um pouco a velocidade de referência e só depois a convergir para o valor pretendido.

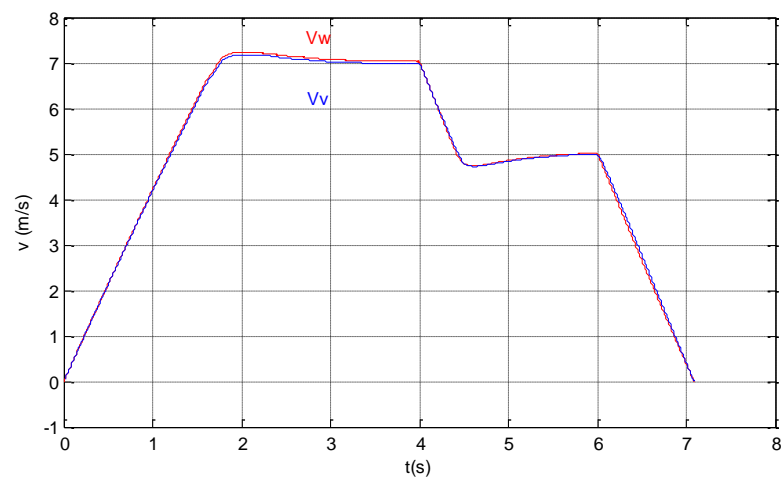


Figura 4.12 - Velocidade das rodas e do veículo

Na Figura 4.13 estão ilustradas a corrente e o binário do motor. A corrente I_{abc} obteve-se através das transformadas de Clarke e Park, tal como já foi indicado no estudo do controlo por

orientação de campo. O binário apresenta uma grande amplitude no início devido ao arranque, diminuindo depois de vencer as forças resistentes ao movimento. Aos 4 segundos é imposta uma velocidade inferior, o que leva o binário por momentos a assumir valores negativos. Por fim, aos 6 segundos ordena-se a imobilização do veículo, obtendo-se assim um binário negativo (com uma amplitude praticamente igual à inicial) para interromper o movimento.

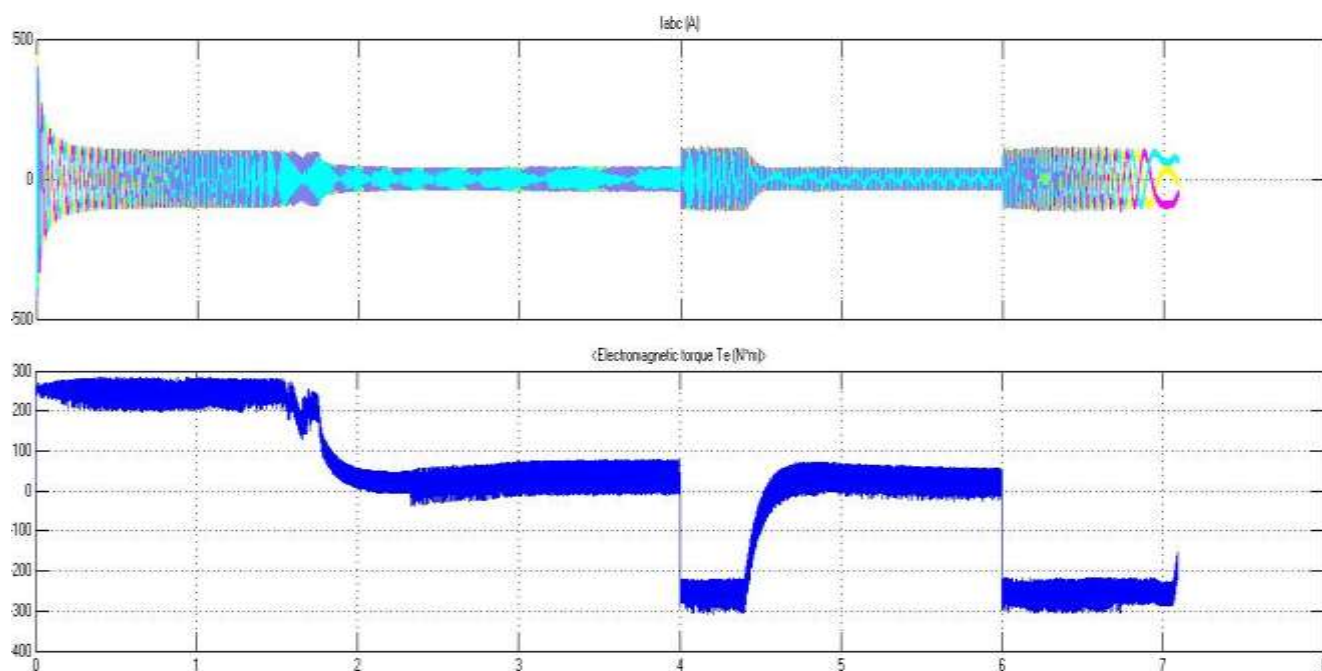


Figura 4.13 - Corrente e binário do motor.

Na Figura 4.14 pode observar-se que no arranque do veículo é necessária uma força maior para o fazer deslocar-se, sendo depois reduzida quando o veículo atinge a velocidade de referência. Quando a velocidade é reduzida aos 4 segundos, também é reduzida a força, atingindo desta forma um valor negativo, de modo a reduzir o movimento. Por fim, aos 6 segundos obtém-se uma nova força negativa devido à travagem do veículo que no fim volta a ser zero.

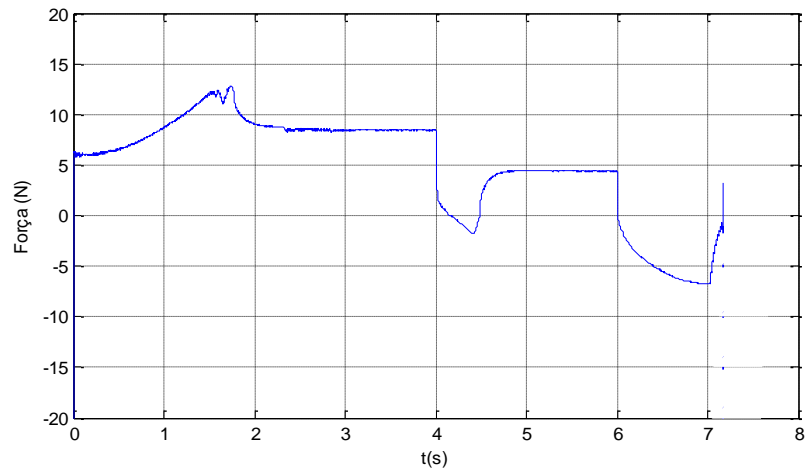


Figura 4.14 - Forças longitudinal no contacto pneu-estrada.

A Figura 4.15 demonstra a distância percorrida segundo o eixo de x.

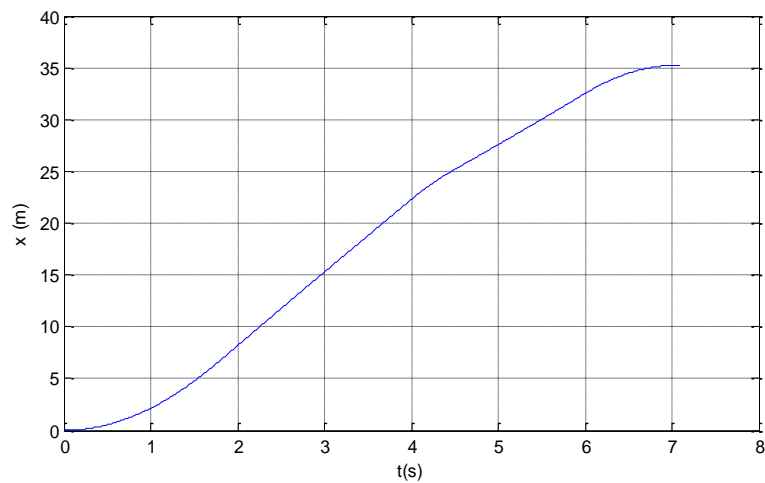


Figura 4.15 - Distância percorrida segundo o eixo x.

4.3. Motor Síncrono de Magnetos Permanentes

Neste subcapítulo será feito o estudo do motor síncrono de magnetos permanentes, do seu princípio de funcionamento e da técnica de controlo usada para controlar a sua velocidade, fazendo no fim uma análise dos resultados obtidos.

A Figura 4.16 ilustra as duas formas normalmente usadas na construção dos motores síncronos de magnetos permanentes. Na máquina de magnetos exteriores, estes são colados ao rotor, sendo o entreferro magnético muito elevado. Nas máquinas de magnetos interiores, estes encontram-se inseridos no núcleo do rotor, sendo a reactância segundo o eixo d inferior àquela que se verifica segundo o eixo q .

De seguida será feita uma descrição sobre o princípio de funcionamento deste tipo de motores.

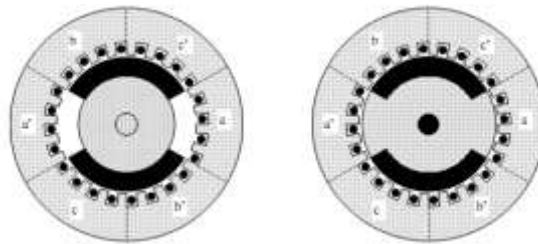


Figura 4.16 - Constituição do motor de magnetos permanentes (sendo os magnetos a parte preta e o ferro a parte cinzenta) [20].

4.3.1. Princípio de funcionamento

O motor síncrono funciona em sincronismo com o sistema de alimentação. Este tipo de motores possui o estator e os enrolamentos do rotor muito semelhantes aos dos motores assíncronos trifásicos. Assim como no motor assíncrono, a circulação de corrente no enrolamento distribuído do estator produz um fluxo magnético girante que progride em torno do entreferro (como já foi estudado anteriormente).

A velocidade de rotação do campo girante é designada por velocidade de sincronismo, sendo esta representada pela equação (4.14):

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (4.14)$$

sendo:

n_s - velocidade síncrona do campo girante [rpm];

f - frequência da tensão de alimentação [Hz];

p - número de pares de pólos.

O rotor é constituído por magnetos permanentes, criando pólos magnéticos que rodam sincronamente. Uma vez que não existem enrolamentos no rotor, as perdas de Joule são inexistentes, o que faz com que o motor tenha um rendimento superior em relação ao motor assíncrono.

4.3.2. Modelo dinâmico do motor síncrono de magnetos permanentes

Tal como nos motores anteriores, pretende-se estudar a evolução do binário e corrente do motor em conjunto com o veículo em diferentes fases de percurso. O binário eletromagnético do motor síncrono de magnetos permanentes é determinado pela equação (4.15) [26]:

$$T_e = \frac{3P}{2} \left[\frac{1}{2} (L_d - L_q) i_s^2 \sin(2\delta) + \lambda_{af} i_s \sin(\delta) \right] \quad (4.16)$$

sendo P o número de pares de pólos, L_d e L_q as indutâncias nos eixos d e q , i_s a corrente do estator, δ o ângulo do binário e λ_{af} o fluxo magnético resultante da interação magnética criada pelos magnetos permanentes entre o estator e o rotor.

As variáveis nos eixos d , q são obtidas a partir das variáveis definidas nos eixos abc através da transformada definida por:

$$\begin{bmatrix} v_q \\ v_d \\ v_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

O sistema de equações (4.17) é obtido através das transformadas de Clarke e de Park. As variáveis nas coordenadas abc são obtidas a partir das variáveis d, q através da transformada inversa definida por:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_q \\ v_d \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

As coordenadas usadas foram as do tipo abc da equação (4.18), que serão criadas pelo transístor (em conjunto com o sinal proveniente da técnica de controlo e com uma fonte de tensão DC). De seguida, será explicada a técnica de controlo usada no motor síncrono de magnetos permanentes.

4.3.3. Técnicas de controlo do motor síncrono de magnetos permanentes

Os métodos de controlo dos motores síncronos de magnetos permanentes, alimentados em tensão com a corrente controlada, são classificados em relação ao tipo de forma de onda da corrente e ao tipo de sensor utilizado para medir a posição do rotor. Os tipos de forma de onda podem ser retangular e sinusoidal.

No caso dos motores controlados com corrente sinusoidal, existem as seguintes metodologias de controlo:

- Controlo por orientação de campo;
- Controlo direto de binário.

O controlo de corrente retangular (que foi o método implementado) baseia-se no controlo do valor máximo das três correntes de fase, para controlar o binário do motor e gerar os sinais de modulação por largura de pulso (PWM) para comandar o inversor de tensão. A modulação é gerada de forma a criar nos enrolamentos do estator correntes retangulares de acordo com o sector em que o rotor se encontra. A posição do rotor pode ser obtida por sensores de baixa resolução, sensores de Hall.

4.3.3.1. *Controlo de Corrente Retangular*

O método de controlo de corrente retangular é normalmente usado neste tipo de motores devido à forma trapezoidal das suas forças contra eletromotrizes, como se pode observar na Figura 4.17.

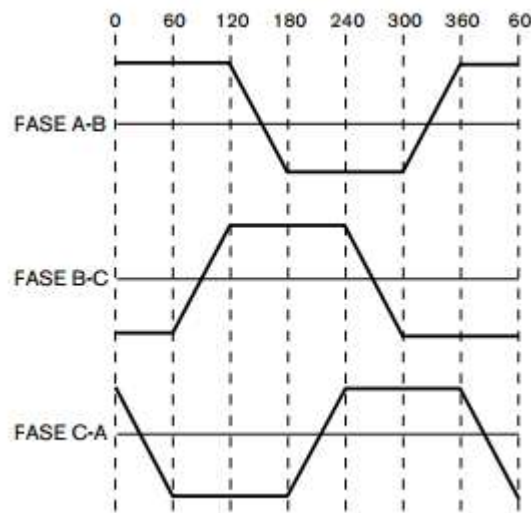


Figura 4.17 - Forma de onda trapezoidal das forças contra eletromotrizes nos motores síncronos de magnetos permanentes [19].

Para se criar o campo girante, aplica-se uma determinada sequência na alimentação das fases do estator. Para produzir o binário que se pretende, é necessário controlar o avanço entre o campo e o rotor.

Só é possível alimentar corretamente os enrolamentos do estator, sabendo a posição do rotor. Para este efeito, são utilizados três sensores de Hall ligados ao estator que produzem seis sinais digitais consoante a posição. Desta forma, é verificada uma alteração do valor dos sensores de Hall de 60 em 60 graus elétricos, tal como se pode observar na Figura 4.18.

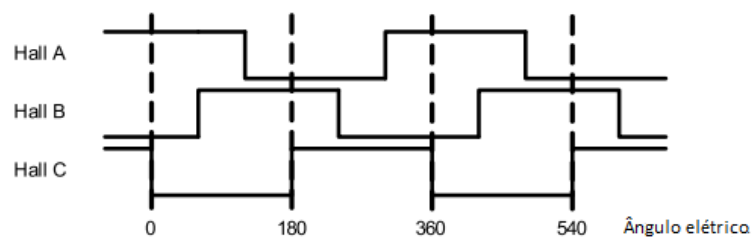


Figura 4.18 - Sinais obtidos pelos sensores de Hall (adaptado de [19]).

A Figura 4.19 apresenta um inversor trifásico tipicamente usado nesta técnica de controlo. Os semicondutores são controlados em função dos sensores de Hall, de modo a haver instantaneamente duas fases em condução e uma em não condução.

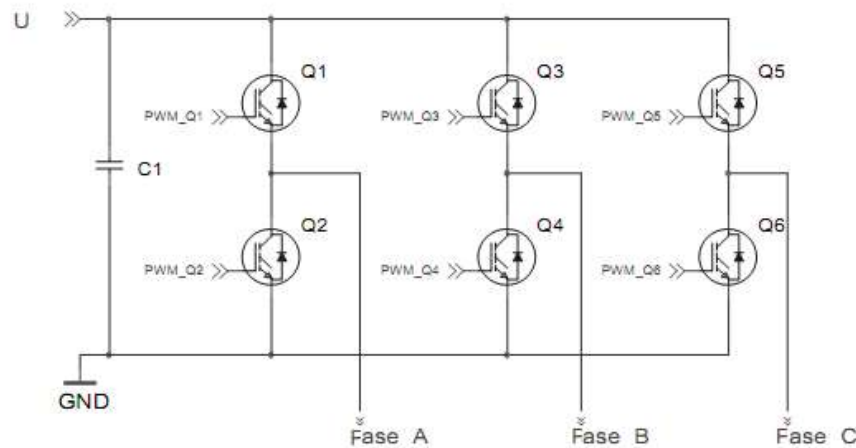


Figura 4.19 - Inversor trifásico [18].

Na Figura 4.20 é possível ver os vários setores do rotor e os vetores de fluxo do estator. Os sensores de Hall irão detetar em que setor se encontra o rotor e de seguida serão aplicados os sinais de controlo dos semicondutores para ter o controlo desejado. A partir do momento em que a posição do rotor é determinada, pretende-se depois movê-lo para o setor que forneça o binário pretendido. Esta deslocação é feita mediante o “melhor percurso”. Caso o setor para o qual se pretende deslocar seja mais perto fazendo um movimento para a esquerda, deve aplicar-se a sequência da Tabela 4.4, caso contrário, a da Tabela 4.3.

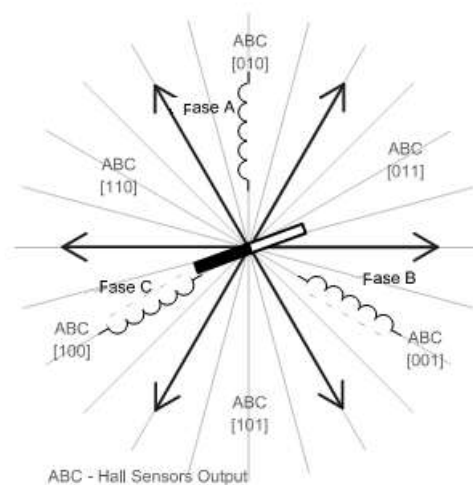


Figura 4.20 - Vetores de fluxo do estator no controlo de corrente retangular [18].

A Tabela 4.3 e a Tabela 4.4 apresentam os sinais de controlo que são utilizados nos semicondutores consoante a posição do setor do rotor. Aplicando a sequência de comutação da Tabela 4.3, o motor roda no sentido dos ponteiros do relógio, e aplicando a da Tabela 4.4, roda no sentido contrário dos ponteiros do relógio.

Tabela 4.3 - Sequência de comutação no sentido dos ponteiros do relógio

Setor	Hall A	Hall B	Hall C	Semicondutores ativos
1	0	0	1	Q1, Q4
2	0	0	0	Q1, Q2
3	1	0	0	Q5, Q2
4	1	1	0	Q5, Q0
5	1	1	1	Q3, Q0
6	0	1	1	Q3, Q4

Tabela 4.4 - Sequência de comutação no sentido contrário dos ponteiros do relógio

Setor	Hall A	Hall B	Hall C	Semicondutores ativos
6	0	1	1	Q5, Q2
5	1	1	1	Q1, Q2
4	1	1	0	Q1, Q4
3	1	0	0	Q3, Q4
2	0	0	0	Q3, Q0
1	0	0	1	Q5, Q0

4.3.4. Implementação do modelo completo de simulação

Na Figura 4.21 é possível observar o diagrama de blocos da simulação do controlador de corrente retangular usado no motor síncrono de magnetos permanentes. Este modelo encontra-se disponível na biblioteca SimPowerSystems do Simulink, tendo sido alterado para operar com a dinâmica do veículo.

O controlo da velocidade é realizado através de um controlador PI que limita o seu valor e gera a referência da tensão (limitando-a assim consequentemente). O motor é alimentado através de um conversor CC/CC que é alimentado por uma bateria, tal como ilustra a Figura 3.7. Os blocos azuis “Gates1” e “Decoder1” implementam as tabelas de codificação dos sensores de Hall, que irão determinar a posição do rotor e seleccionar os semicondutores a serem ativados.

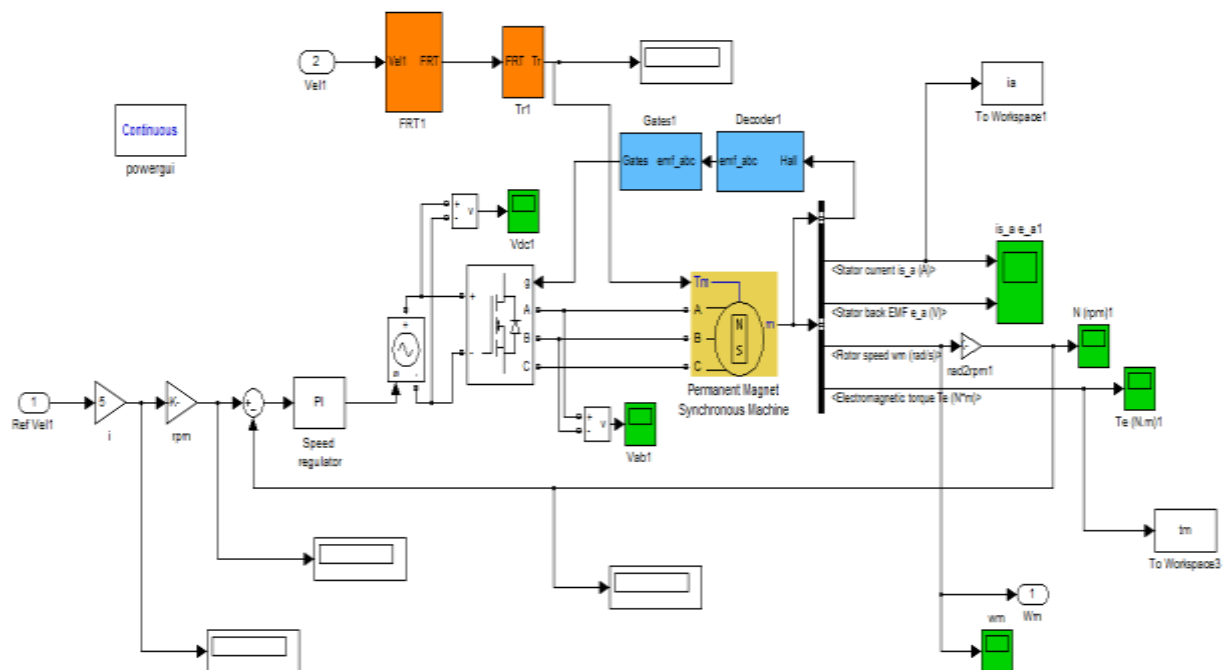


Figura 4.21 – Diagrama esquemático do MSMP com controlo de corrente retangular.

Na Tabela 4.5 podem observar-se as características do Motor Síncrono de Magnetos Permanentes usado na simulação.

Tabela 4.5 - Características do motor Síncrono de Magnetos Permanentes

Motor Síncrono de Magnetos Permanentes	
Potência Nominal	5
Resistência de fase do induzido (Ω)	2.8750
Indutância de fase do induzido (H)	8.5×10^{-3}
Fluxo de ligação estabelecido pelos magnetos ($V.s$)	0.175
Binário constante ($N.m$)	112.5
Inércia total ($kg.m^2$)	8×10^{-3}
Fator de atrito ($N.m.s$)	1×10^{-3}
Par de pólos	4

A Figura 4.22 ilustra a velocidade do veículo e das rodas na mesma situação simulada com o motor CC e o motor assíncrono. É possível ver que através do controlo de corrente retangular, o veículo apresenta uma resposta sobre-armortecido, não havendo picos de velocidade desnecessárias. A velocidade vai aumentando e converge para a velocidade de referência. Pode-se observar também que o veículo apresenta um bom tempo de resposta.

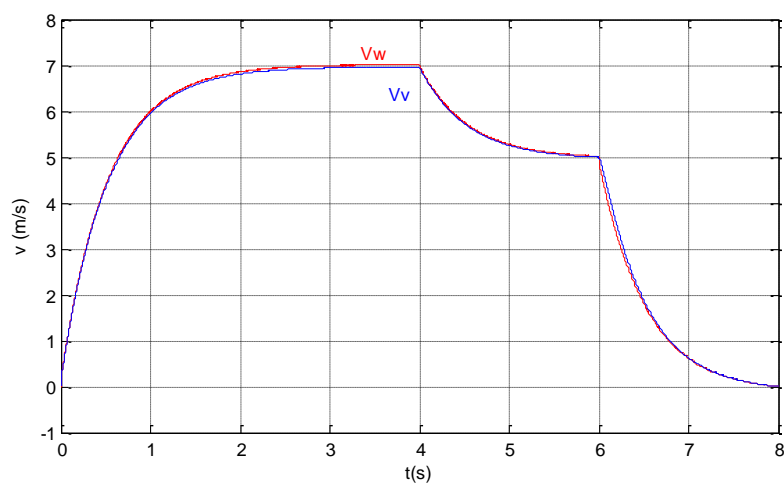


Figura 4.22 - Velocidade das rodas e do veículo.

A Figura 4.23 apresenta o escorregamento do pneu para a situação anterior. Tal como era de esperar, no arranque existe um maior escorregamento, uma vez que o veículo se encontra parado e as rodas iniciam o seu movimento. Após atingir uma velocidade constante, o escorregamento diminui. Aos 4 segundos é imposta uma velocidade inferior à atual, diminuindo ainda mais o escorregamento. Por fim, aos 6 segundos pretende-se começar a imobilizar o veículo. Este acontecimento provoca um grande escorregamento, porque as rodas começam a reduzir a velocidade, mas o veículo continua a possuir a sua velocidade anterior por instantes. As oscilações finais devem-se ao facto de a mobilização do veículo não ser realizada apenas com uma travagem. O controlador de velocidade leva a velocidade do veículo para zero gradualmente, fazendo sucessivas travagens (com a velocidade atual a convergir para a velocidade imposta).

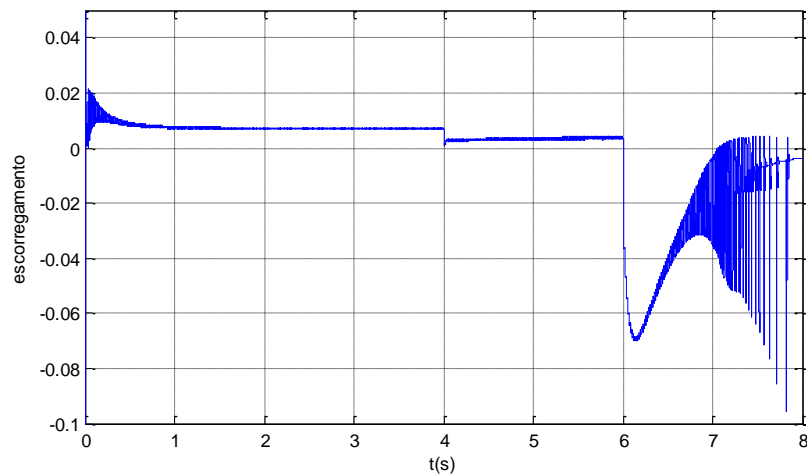


Figura 4.23 – Escorregamento.

Na Figura 4.24 é possível observar a corrente do motor obtida com o controlo de corrente retangular, durante o percurso efetuado. É possível verificar a forma de onda retangular da corrente obtida através da técnica de controlo. Inicialmente obtém-se uma maior amplitude da corrente, devido ao arranque do veículo. Aos 4 segundos há uma redução de velocidade de 7m/s para 5 m/s, o que provoca a diminuição da corrente. Aos 6 segundos começa-se a imobilização do veículo, diminuindo assim a amplitude da corrente até ao valor zero (quando o veículo pára).

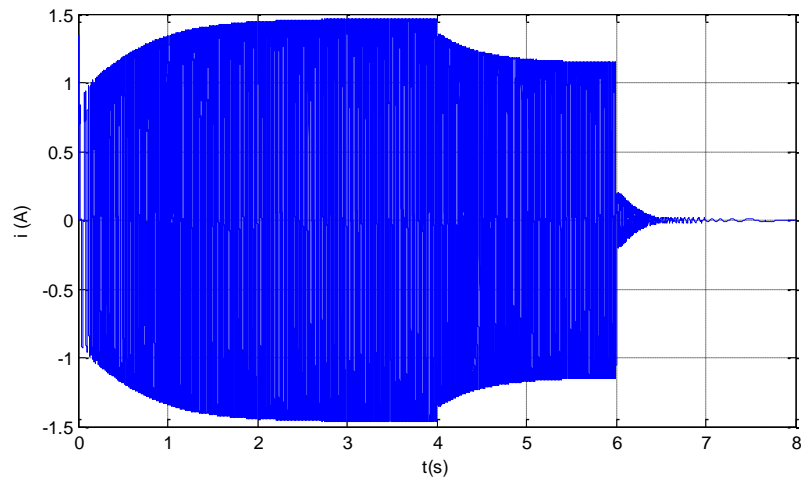


Figura 4.24 - Corrente no rotor do motor.

A Figura 4.25 ilustra o binário, podendo-se observar uma maior amplitude no início, e uma diminuição depois quando se reduz a velocidade aos 4 segundos. Quando é ordenada a imobilização do veículo aos 6 segundos, há uma redução do binário, atingindo um valor negativo, e por fim de zero (quando o veículo estiver finalmente parado).

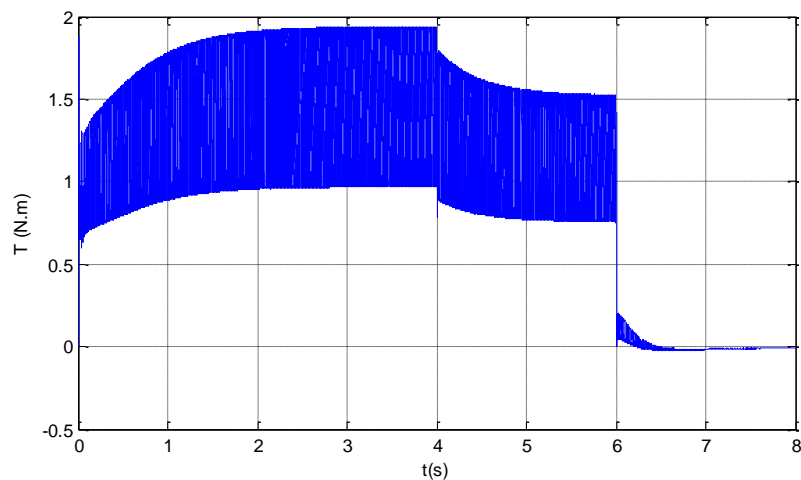


Figura 4.25 - Binário do motor.

A Figura 4.26 mostra a força inicial que o veículo faz para vencer o atrito de modo a começar o seu movimento. Aos 4 segundos é imposta uma velocidade inferior ao veículo, diminuindo assim a força longitudinal. Aos 6 segundos pretende-se imobilizar o veículo, o que resulta numa força negativa. Por fim, quando o veículo já estiver imobilizado, a força volta a ser zero.

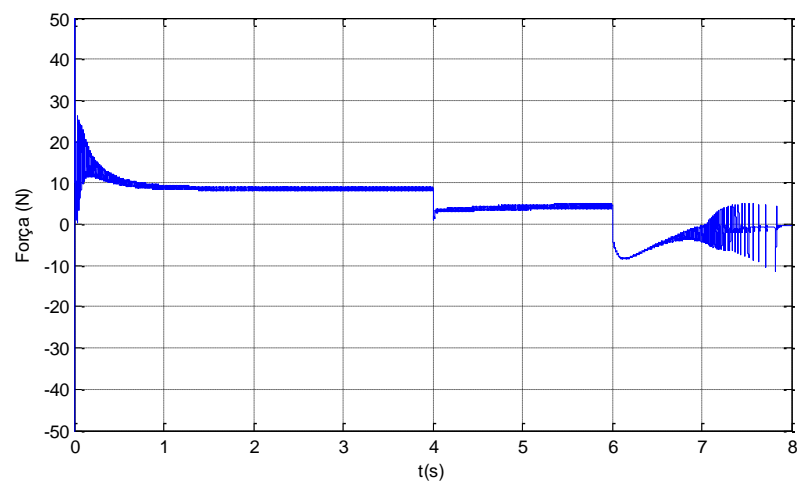


Figura 4.26 - Forças longitudinal no contacto pneu-estrada.

A Figura 4.27 mostra a distância percorrida pelo veículo, que foi obtida através do integral da velocidade.

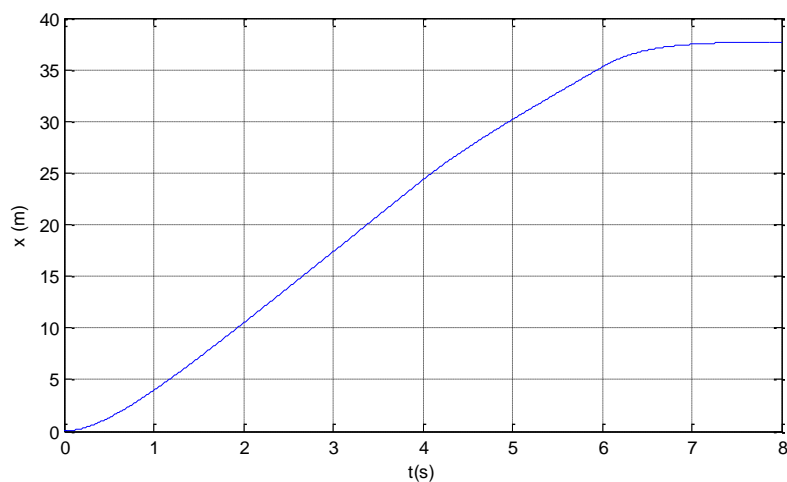


Figura 4.27 - Distância percorrida segundo o eixo x.

É de notar que os três motores utilizados tinham todos a mesma potência de 5 cavalos, possibilitando desta forma uma melhor comparação entre o desempenho de cada um.

Resumidamente, as técnicas usadas para controlar os diferentes motores apresentam algumas vantagens e desvantagens em relação às outras. No primeiro caso do motor CC sem acionamento, foi usado um controlador PID. Este controlador é fiável e fácil de implementar. Tal como se viu, o

veículo realizou a dinâmica pretendida. Como desvantagem, tem o facto de ser difícil de sintonizar e não é compatível para todos os sistemas.

No motor assíncrono, em que foi usado o controlo por orientação de campo, observou-se que existe um pouco de sobrelevação na resposta pretendida. Este método tem como vantagem o facto de não depender do valor da resistência do rotor que varia com a temperatura e o controlo do motor assíncrono passa a ser semelhante a um motor CC com excitação independente, permitindo o controlo independente do fluxo e do binário. Como desvantagens, tem a necessidade de saber a posição exata do rotor e não aconselhável em malha aberta.

Por fim, no motor síncrono de magnetos permanentes, usando o controlo de corrente retangular tem-se facilidade no controlo do motor devido à forma trapezoidal das suas forças contra eletromotrizes (e tal como se verificou, os resultados foram de acordo com o pretendido). Para além disso, não é necessário conhecer a posição instantânea do rotor e é independente dos parâmetros do rotor. Como desvantagem, apresenta um custo elevado. A Tabela 4.6 apresenta de forma sucinta as vantagens e desvantagens mencionadas dos métodos de controlo usados.

Tabela 4.6 - Vantagens e desvantagens dos métodos de controlo implementados.

	PID	Controlo por Orientação de Campo	Controlo de Corrente Retangular
Vantagens	Fiável	Controlo independente do fluxo e do binário	Posição instantânea do rotor não é necessária
	Fácil implementação	Independente da resistência do rotor	Independente dos parâmetros do rotor
Desvantagens	Difícil de dimensionar	Necessário saber a posição do rotor	Custo elevado

5. Conclusões e trabalho futuro

5.1. Conclusões

A análise do estado da arte permitiu analisar a situação presente relativa ao desenvolvimento de veículos elétricos, a nível de topologias, sistemas de propulsão e controlo.

Nesta dissertação foi estudada a dinâmica do veículo em conjunto com três tipos de motorizações, concluindo-se que algumas técnicas de controlo apresentam melhores resultados que outras.

No estudo da dinâmica do veículo, verificou-se que as forças mais resistentes ao arranque do veículo são as forças de resistência ao rolamento do pneu e a força de inclinação (caso o veículo se encontre parado numa subida). Conforme o veículo for ganhando cada vez mais velocidade, estas forças passam a ser menos significativas, tornando-se a força de resistência aerodinâmica a mais contraditória ao movimento. É devido a este fator que estão constantemente a haver alterações nos formatos dos veículos, de modo a torna-los mais aerodinâmicos e assim sofrerem menos forças resistentes ao vento.

O motor CC é uma escolha comum entre os veículos elétricos, devido à facilidade do seu controlo. Ainda assim apresenta desvantagens, tais como o seu peso e preço elevado. Para além disso, verificou-se que apresenta uma boa resposta à velocidade pretendida. Como se observou na implementação prática do motor CC, o sistema de controlo de velocidade do veículo apresenta uma resposta sobre-armortecida, convergindo para a velocidade de referência com um bom tempo de resposta e um comportamento razoável, uma vez que manteve este comportamento em todas as variações de velocidade.

No motor assíncrono foi usado o controlo por orientação de campo para controlar o motor. Este método permitiu controlar o motor assíncrono como se fosse um motor de corrente contínua. Como se pode observar pelos resultados, o controlo de velocidade do veículo apresenta um pouco de sobrelevação, ultrapassando ligeiramente no início a velocidade pretendida, e só depois converge para o valor correto. Isto sucede devido ao controlador PI usado nesta técnica de controlo, que é incapaz de obter velocidade antecipada do veículo.

Os motores síncronos de magnetos permanentes têm sido muito utilizados para aplicação em veículos elétricos, competindo diretamente com os motores assíncronos. Isto acontece porque a

utilização de magnetos permanentes resulta numa diminuição de peso e volume dos motores e, consequentemente, numa densidade de potência mais elevada. Para além disso, este motor apresenta também uma elevada eficiência, pois apresenta perdas reduzidas no rotor e o aumento de temperatura verifica-se apenas no estator. A grande desvantagem associada aos motores síncronos de magnetos permanentes está relacionada com a sua complexa construção. Para este motor foi usado o controlo de corrente retangular. Este método apresenta diversas vantagens, como por exemplo: o controlo da corrente e de binário é realizado através do controlo da corrente apenas numa das fases em cada instante; é independente dos parâmetros do motor e o binário é praticamente constante, exceto nos instantes em que há uma comutação da alimentação das fases. Nos resultados obtidos para este motor, observou-se que o veículo apresenta uma resposta sobre-armortecido, tal como era desejado. Conclui-se assim que o motor síncrono de magnetos permanentes com o controlo de corrente retangular é um método bastante fiável para veículos elétricos.

O motor CC e o motor síncrono de magnetos permanentes apresentam resultados semelhantes em relação ao controlo de velocidade do veículo. No entanto, o motor CC é mais pesado e tem um menor rendimento, enquanto que o motor síncrono de magnetos permanentes é mais leve e apresenta uma melhor relação de potência/volume. O controlador do motor CC é mais barato e mais simples de implementar.

Para finalizar, tendo em conta os avanços da tecnologia e os resultados apresentados, pode concluir-se que os veículos elétricos são uma aposta fiável, uma vez que apresentam um bom controlo de velocidade.

5.2. Trabalho futuro

Seria interessante implementar na prática as técnicas de controlo estudadas ao longo da tese e estudar ainda mais técnicas para cada motor. Implementando a parte prática, seria possível comprovar os resultados reais com os resultados obtidos no *Matlab*.

6. Bibliografia

- [1] PACEJKA, Hans. *Tyre and Vehicle Dynamics*. Butterworth-Heinemann Limited, 2002.
- [2] U.S. Department of energy, 2009:
http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/avta/light_duty/fsev/fsev_ev_power.html
- [3] RAJAMANI, Rajesh. *Vehicle Dynamics and Control*. Springer London, Limited, 2006
- [4] CHAN, C. C. *The state of the art of electric and hybrid vehicles*. In Proceedings of the IEEE Volume 90, Issue 2, Pages: 247 – 275, February 2002.
- [5] PINA, João Murta. Apontamentos da cadeira de Accionamentos Electromecânicos Especiais. Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2011.
- [6] GRILO, Nuno. *Concepção e Caracterização de um Motor de Indução para Integração num Veículo Eléctrico Comercial*. Tese de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico, Outubro, 2010.
- [7] FOITO, Daniel. *Veículo Eléctrico Bimotor com Controlo de Estabilidade e de Tracção*. Tese de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico, 2002.
- [8] GILLESPIE, Thomas. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. SAE International, February 1992.
- [9] MARTINS, João. Apontamentos da cadeira de Tracção Eléctrica. Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2012.
- [10] KIENCKE, Uwe; NIELSEN, Lars. *Automotive Control Systems For Engine, Driveline, and Vehicle*. Springer, 2nd edition, 2005.
- [11] KRISHNAN, R. *Electric Motor Drives Modeling, Analysis, and Control*. Prentice Hall, 2001.
- [12] NASAR, Syed. *Electric Machines and Electromechanics*. McGraw-Hill Book Companies, Inc., 1990.
- [13] POMÍLIO, J. A. *Eletrónica de Potência*. Universidade Estadual de Campinas, Eletrónica de Potência, 2009.
- [14] CONNER, Margery. *Permanent-magnet motors boost efficiency and power density*. EDN network, September, 2007:
https://edn.com/file/11867-Figure_2b.pdf
- [15] NEVES, Mário Ventim. Apontamentos da Cadeira de Eletrotecnia Teórica – Máquina de Indução. Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2005.
- [16] BOSE, Bimal. *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey, 2002.
- [17] PALMA, João C. P. *Accionamentos Electromecânicos de Velocidade Variável*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1999.
- [18] ELEVICH, Leonard N. *3-Phase BLDC Motor Control with Hall Sensors Using 56800/E Digital Signal Controllers*. Freescale, 2005.

- [19] LEE, Shiyong. *A Comparison Study of the Commutation Methods for the Three-Phase Permanent Magnet Brushless DC Motor*. Pennsylvania State University Berks Campus:
<http://www.magnetlab.com/uploads/4c51d9ba6fe5a.pdf>
- [20] MARQUES, Gil. *Controlo de Motores Eléctricos*. Tese de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico, 2007.
- [21] Veículos Eléctricos PT, 2009:
<http://www.veiculoselectricospt.com/historia-dos-veiculos-electricos/>
- [22] TRZYNADLOWSKI, Andrzej M. *Control of Induction Motors*. Academic Press, 2000.
- [23] YOUN, Dayana. *Controlo Directo de Binário da Máquina de Indução Duplamente Alimentada por Conversor Matricial para Geradores Eólicos*. Tese de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico, 2010.
- [24] SILVA, Rui Neves. *Apontamentos da cadeira de Teoria de Controlo*. Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2010.
- [25] FITZGERALD, Umans SD. *Máquinas Eléctricas*. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- [26] LOPES, Francisco. *Estudo e Comparação de Diferentes Métodos de de Motores Síncronos com Ímanes Permanentes*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [27] GRANADEIRO, Samuel. *Controlo de Motor Assíncrono Aplicado a Veículos Eléctricos*. Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2009.
- [28] PATANÉ, Edson. *Implementação de Controle de Velocidade em Malha Fechada para Motores de Corrente Contínua utilizando Sistema de Aquisição de Dados*. Tese de Mestrado, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, 2008.
- [29] HERMAN, Stephen L. *Electric Motor Control*. Delmar Cengage Learning, 2010.
- [30] OGATA, Katsuhiko. *System Dynamics*. Prentice Hall, 2003.
- [31] KRISHNAN, R. *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*. CRC Press, 2009.

